

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси»

№ 60(1102)2014

Збірник наукових праць

Видання засновано в 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2014

Вісник Національного технічного університету "ХПІ"

Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси.
– Х.: НТУ „ХПІ» – 2014р. - №60(1102) –204 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ №5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

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 постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. №1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України №6, 2010 р., стор. 3, №20).

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, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; 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. Дмитриченко, 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. М. Кошельник, 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. Пуляев, 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. Тимофіїв, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія

Відповідальний редактор: Дьомін Д. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

Відповідальний секретар: Костик В. О., канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»;

Члени редколегії: Акімов О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Березуцький В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дмітрік В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дудніков А. А., канд. техн. наук, ПДАА, Полтава, Заблоцький В. К., д-р техн. наук, ДДМА, Краматорськ, Заміховський Л. М., д-р техн. наук, ІФТУНГ, Івано-Франківськ, Євстратов В. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Погрібний М. А., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Пономаренко О. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Соболь О. В., д-р фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Шоман О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Jozef Voynarovsky, проф., Сілезького політехнічного інституту, Польща, Rab Nawaz Lodhi, проф. Bahria University Islamabad Pakistan, Пакистан, Меркер Е. Е., д-р техн. наук, проф., Старооскольський технологічний інститут – філія Національного дослідницького технологічного інституту «Московський інститут сталі і сплавів», Росія

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ „ХПІ"

Протокол № 11 від « 22 » грудня 2014 р.

Л. П. АНТОНЕНКО, канд. хим. наук, доц., НТУУ «КПИ», Киев;

А. П. ХОХОТВА, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПИ», Киев;

Ю. Н. ЗАДНИПРЯНЕЦ, студентка, НТУУ «КПИ», Киев;

В. В. ТИМОШЕНКО, аспирант, Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев;

Т. И. ДЕМЫШОК, аспирант, НТУУ «КПИ», Киев;

О. Н. ДЗЮБАК, инженер, ГП «ОС «МАСМА-СЕПРО», Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ НАНОПОРОШКА АЛМАЗА НА АДСОРБЦИЮ ИОНОВ МЕДИ

Исследованы адсорбционные свойства нанопорошка алмаза детонационного синтеза АСУД 99р в статических условиях. Установлено, что сорбция ионов меди обоими адсорбентами удовлетворительно описывается моделью псевдо-второго порядка в статических условиях. Представлена сравнительная характеристика нанопорошков алмаза АСУД 99р и АСУД 99. Сделана математическая обработка кривых адсорбции, используя кинетические модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка, и рассчитаны константы скорости.

Ключевые слова: порошок алмаза детонационного синтеза, адсорбция, ионы тяжелых металлов, кинетика

Введение. Тяжелые металлы, которые попадают в окружающую среду в результате деятельности человека, являются опасными загрязнителями биосферы. Они попадают в окружающую среду в результате переработки металлов, производства красок, удобрений, сгорания топлива, вывоза мусора и т.п.

Тяжелые металлы относятся к стойким химическим загрязнителям с токсичными свойствами [1]. Попадая в водную среду, они взаимодействуют с другими компонентами среды, образуя гидратированные ионы, оксигидраты, ионные пары, комплексные неорганические и органические соединения [2]. Загрязнение пресных водоемов солями тяжелых металлов является актуальной проблемой во многих регионах планеты. Поэтому попадание тяжелых металлов в атмосферу, водоемы и почву должно быть взято под контроль. Одной из самых распространенных технологий для удаления тяжелых металлов из водной среды является фильтрование [3].

Выбор фильтровальных материалов необычайно широк: от тканей и фильтровальной бумаги до экзотических материалов, например, измельченной скорлупы грецкого ореха или испанского мха [2]. Фильтровальные материалы используются во всех основных отраслях промышленности. Для большинства процессов разработаны специальные фильтровальные материалы [2], однако иногда требуется их комбинация, если дисперсные системы очень трудно разделить.

Адсорбционный метод является хорошо управляемым процессом, он позволяет удалять загрязнения в водной среде независимо от их химической стойкости. Поэтому перспективной является развитие фильтровально- сорбцион-

ных технологий, предназначенных для локальной доочистки питьевой воды. В настоящее время наиболее распространенными адсорбентами для биологических сред являются углеродсодержащие адсорбенты.

Углерод – уникальный элемент: он единственный может образовывать длинные цепи связанных между собой атомов – углеродные скелеты органических молекул. Именно разнообразием углеродных скелетов и типов химических связей между атомами углерода объясняется большое количество известных ныне аллотропных форм углерода. Из них две формы – алмаз и графит – известны человечеству с незапамятных времен, а молекулярная форма (фуллерены) и «наноформы» (наноалмазы и нанотрубки) открыты всего несколько десятилетий назад. Среди всех «наноформ» углерода наноалмаз – ближайший к естественному состоянию углерода.

Обычный алмаз образует очень прочную атомную кристаллическую решетку, в которой каждый атом углерода находится в sp^3 -гибридном состоянии и соединен одинарными связями с четырьмя соседними, расположенными в вершинах тетраэдра. Наноалмаз имеет такую же кристаллическую структуру, как и собственно алмаз, но его кристаллы значительно меньше: от 2 до 8 нм. Благодаря этому большая часть атомов углерода находится на поверхности, где свойства вещества отличаются от свойств в объеме [3]. Размеры наночастиц алмаза определяются размерами монокристаллических частиц и могут принимать значения от нескольких ангстрем до нескольких миллиметров или сантиметров при переходе от наноалмазов к монокристаллам. Обычно с увеличением дисперсности порошков увеличивается их агрегативная и седиментационная устойчивость, а соответственно увеличивается свободная и междуфазная энергия, которая согласно принципу Гиббса-Гельмгольца в дисперсных системах должна уменьшаться. Малый размер частиц нанопорошка алмаза обуславливает их большую удельную поверхность, что приводит к увеличению свободной поверхностной энергии. Получение нанопорошков с высокой удельной поверхностью осуществляется специальными методами формирования поверхностных свойств [3].

В Институте сверхтвёрдых материалов НАНУ в последние годы разработан новый класс углеродсодержащих адсорбентов на основе алмазных нанопорошков с определённым соотношением углеродных фаз sp^2 - и sp^3 -гибридизации, обладающих уникальными адсорбционными свойствами. Для расширения области применения таких нанопорошков в качестве адсорбентов биологических сред выполнено направленное формирование поверхностных свойств путем специальной реконструкции. Реконструкция поверхности порошков алмаза заключается в процессе изменения содержания кислородсодержащих групп, с целью придания новых свойств порошкам в будущем. Установлено, что максимальной адсорбционной активностью обладают нанопорошки алмаза, содержащие 10 – 20 масс. % углеродной фазы sp^2 -гибридизации [4].

Реконструкция поверхности является сложным физико-химическим процессом, который предусматривает ряд обработок поверхности нанопорошков алмаза, как термохимическое, химическое и электрохимическое. Обычно, на поверхности нанопорошков алмаза находится большое количество кислородсодержащих групп, которые и определяют агрегацию порошков [3].

Поэтому для увеличения удельной поверхности нанопорошков алмаза и снижения агрегативной способности алмазных частиц необходимо уменьшить содержание кислородсодержащих групп на поверхности частиц путем разработки новых схем реконструкции поверхности нанопорошков алмаза. Области применения наноалмазов связанные с поверхностной активностью материала. Наноалмаз имеет большую удельную поверхность, химическую природу которой можно изменять путем введения различных функциональных групп. Кроме того, доказано, что наночастицы алмаза биосовместимы и имеют низкую токсичность. Все это позволяет использовать их в биологии и медицине [5].

Цель работы. Целью работы является сравнение наноалмаза марки АСУД 99 детонационного синтеза и реконструированного наноалмаза этой же марки для сорбции ионов меди (II) и разработки практических рекомендаций для создания фильтровального материала с использованием этих порошков для очистки воды от ионов тяжелых металлов.

Методика экспериментов. Для исследования использовали реконструированный нанопорошок алмаза детонационного синтеза марки АСУД 99р и сравнивали его адсорбционную способность с нанопорошком алмаза марки АСУД 99, исследования которого были осуществлены ранее [6 – 9]. Для исследования кинетики сорбции, суспензию адсорбента смешивали с раствором $CuSO_4$ с таким расчетом, чтобы концентрация ионов меди в смеси была 200 мг/дм^3 , а содержание адсорбента 5 мг/дм^3 . Исследования проводили при постоянном перемешивании. Пробы отбирали через определенные фиксированные промежутки времени (2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 и 80 мин), сорбент отделяли от раствора с помощью лабораторной центрифуги, после чего определяли остаточное содержание ионов меди (II) в растворе фотометрическим методом [10].

Обсуждение результатов исследования. При использовании нанопорошка алмаза АСУД 99 (рис. 1) в течение первых 10 мин. концентрация ионов меди в растворе уменьшилось на 23 % и через 25 мин достигла равновесной. В случае же использования нанопорошка алмаза АСУД 99р концентрация ионов меди в течение уже первых 5 мин уменьшилась на 51 %, а равновесная концентрация устанавливается через 15 мин.

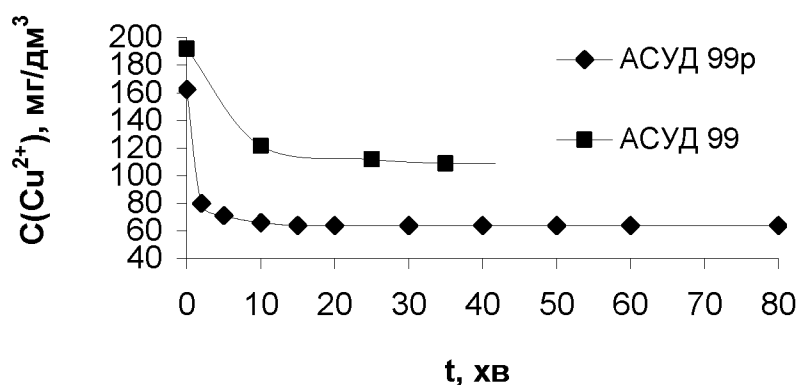


Рис. 1 – Изменение концентрации ионов меди (II) от времени контакта с нанопорошками алмаза АСУД 99 и АСУД 99р

Таким образом, показано, что нанопорошок алмаза

АСУД 99р, благодаря увеличению удельной поверхности вследствие увеличения пористости слоя углерода sp^2 -гибридизации, имеет лучшие адсорбционные свойства.

Для математического обработки кинетической кривой сорбции использовали

кинетические модели псевдо-первого (Лагенгрена) (1) и псевдо-второго (2) порядков, в линейной форме имеют соответственно вид:

$$\ln(q_{\max} - q_t) = \ln q_{\max} - k_1 t \quad (1)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_{\max}^2} + \frac{1}{q_{\max}} t \quad (2)$$

где: q_t – количество ионов меди, адсорбированных в момент времени t , мг/г; q_{\max} – максимальная величина адсорбции иона металла, мг/г; k_1 – константа Лагегрена скорости реакции псевдо-первого порядка, мин⁻¹; k_2 – константа скорости реакции псевдо-второго порядка, г/(мг·мин); t – время адсорбции, мин.

Начальную скорость адсорбции h (мг/(г·мин)), рассчитывали по формуле:

$$h = k_2 q_{\max}^2 \quad (3)$$

Параметры кинетической модели псевдо-первого порядка были получены из линейной графической зависимости начального периода сорбции, построенной в координатах $\ln(q_e - q_t) - t$ (рис 2.)

Для получения коэффициентов кинетической модели псевдо-второго порядка, были построены графические зависимости в координатах $t/q - t$ (рис. 3).

Модель корректно описывает экспериментальные данные, если величина коэффициента детерминации $R^2 \geq 0,95$. Это условие выполняется для кинетической модели псевдо-второго порядка, т.е. она адекватно описывает кинетику сорбции меди на нанопорошках алмаза АСУД 99р и АСУД 99, поэтому для нее были рассчитаны параметры кинетической модели (табл. 1).

Адекватность данной модели также подтверждается тем, что рассчитанные величины максимальной удельной сорбции

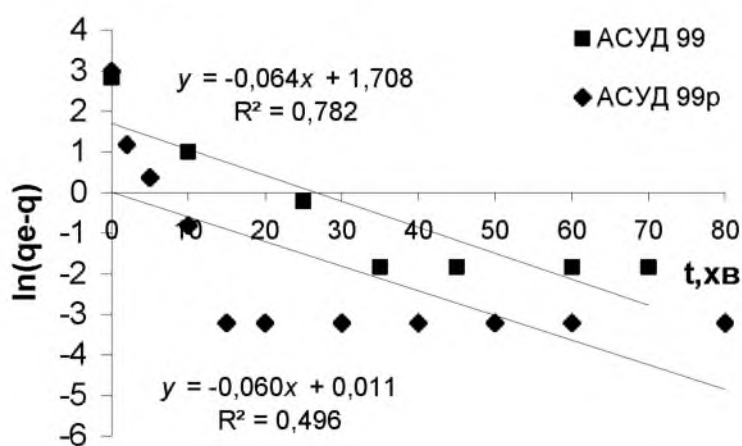


Рис. 2 – Кинетическая модель псевдо-первого порядка в линейной форме для адсорбции ионов меди (II) нанопорошками алмаза АСУД 99р и АСУД 99

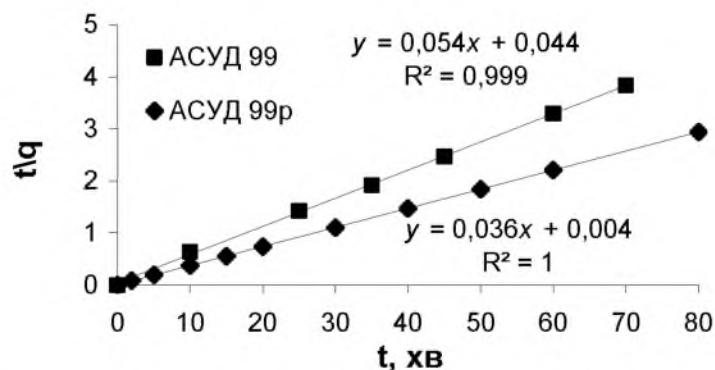


Рис. 3 – Кинетическая модель псевдо-второго порядка в линейной форме для адсорбции ионов меди (II) нанопорошками алмаза АСУД 99р и АСУД 99

q_{max} очень близки к экспериментально полученным.

Константа скорости сорбции Cu^{2+} на АСУД 99р в 4,3 раза больше, чем на АСУД 99, а начальная скорость сорбции – больше почти на порядок, что свидетельствует об очень быстром извлечении ионов меди из раствора.

Нанопорошок алмаза АСУД 99р, использовавшийся в качестве адсорбента, имеет большую стоимость, и использовать его однократно нецелесообразно. Поэтому была исследована возможность его регенерации и пригодности этого материала для сорбции после регенерации.

Для регенерации адсорбента использовали 2 М раствор HCl , затем наноматериал тщательно промывали водой и повторяли исследования по кинетике сорбции на растворе меди с той же концентрацией. Результаты исследования кинетики циклов сорбции – регенерации показаны на рис. 4.

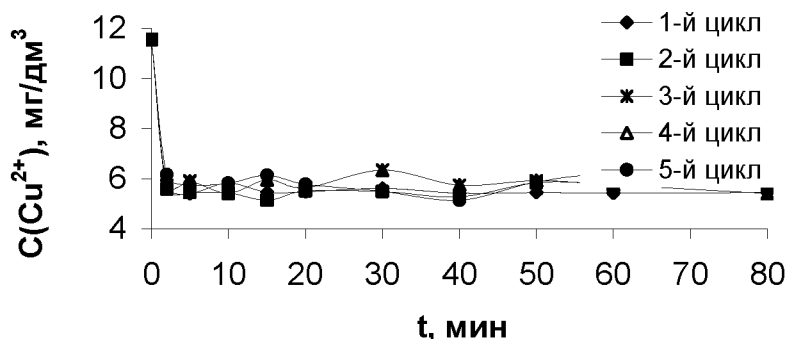


Рис. 4 – Эффективность сорбции ионов Cu^{2+} на нанопорошке алмаза АСУД 99р в последовательных циклах сорбции – регенерации

Как видно из рис. 4, регенерация приводит к полному восстановлению его сорбционных свойств. Эффективность сорбции не уменьшается, а равновесная концентрация устанавливается уже в течение первых минут, не зависимо от количества циклов сорбции – регенерации.

Поскольку нанопорошок алмаза является мелкодисперсным материалом, он будет достаточно быстро вымываться вместе с раствором из фильтрующей загрузки. Поэтому для исследования сорбционных свойств этого материала в динамических условиях будет изготовлен листовой материал с использованием в композиции целлюлозных, каолиновых и полиэфирных волокон.

Выводы. Установлено, что нанопорошки алмаза АСУД 99 и АСУД 99р эффективно удаляют ионы меди из водных растворов в статических условиях. Сорбция ионов меди обоими адсорбентами удовлетворительно описывается моделью псевдо-второго порядка в статических условиях. Эффективность извлечения ионов меди при последовательных циклах сорбции – регенерации на АСУД 99р не уменьшается. Следует отметить, что процесс извлечения ионов меди из водного раствора происходит быстрее при использовании нанопорошка алмаза марки АСУД 99р, поэтому дальнейшие исследования процесса сорбции тяжелых металлов из водных растворов в динамических условиях целесообразно осуществлять именно с этой маркой нанопорошка.

Список литературы: 1. Купчик Л. А. Особливості сорбції йонів важких металів із сольових розчинів лігноцелюлозними сорбентами [Текст] / Л. А. Купчик, А. А. Ніколайчук, Н. Ю. Боровіцький // Вісник НТУУ «КПІ» – 2010. – № 2. – С. 60 – 63. 2. Вегера А. И. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных фильтро-материалов [Текст] / А. И. Вегера, А. И. Ельшин, В. К. Волков, О. Н. Жаркова // Вести ПГУ – Прикладные науки. – 2000. – С. 69 –

74. **3.** *Еремин В. В.* Углеродные нано-материалы [Текст] / *В. В. Еремин* // Ж. Химия – 2009. – № 20. – С. 32 – 41. **4.** *Богатырева Г. П.* Адсорбционные процессы в биологических средах на поверхности алмазных нанопорошков новых марок [Текст] / *Г. П. Богатырева, М. А. Маринич, Г. А. Базалий, Г. Д. Ильницкая* // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2010, Т. 8, № 4, – С. 851 – 859. **5.** *Новиков Н. В.* Наноалмазы: синтезы, свойства, применение [Текст] / *Н. В. Новиков, В. В. Даниленко, Г. П. Богатырева, В. И. Падалко* // Международная академия КОНТЕНАНТ. – 2010. – С. 4 – 22. **6.** *Антоненко Л. П.* Получение фильтровального материала с использованием наноматериалов для очистки стоков от тяжёлых металлов. [Текст] / *Л. П. Антоненко, Н. В. Чучулина, Г. П. Богатырёва, М. Г. Маринич, Г. Д. Ильницкая, Т. И. Демьшук* // Энерготехнологии и ресурсосбережение, – 2011. – № 6. – С. 49 – 54. **7.** *Антоненко Л. П.* Очищення води від іонів міді нанопорошками алмазу [Текст] / *Л. П. Антоненко, Н. В. Чучуліна, О. П. Хохотва, Т. І. Демішок, О. М. Боженко* // Вісник НТУУ «КПІ». – 2011. № 1 (7) – С. 80 – 83. **8.** *Богатырева Г. П.* Повышение фильтрующей способности бумажных фильтров. [Текст] / *Г. П. Богатырева, Г. Д. Ильницкая, Л. П. Антоненко, О. В. Лещенко* // Сборник научных трудов XIX международная научно-техническая конференция «Экологическая и техногенная безопасность. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов» 11 – 15 июня 2012. г. Бердянск – С. 90 – 100. **9.** *Zadniprovanets Y. N.* Obtaining a filter material with applying nano-powder of diamond [Text] / *Y. N. Zadniprovanets, A. Y. Babich, L. P. Antonenko* // International Youth Science Environmental Forum “Ecobaltica ‘ 2013” December 6 – 7 2013. St.-Peterburg, Russia – P. 29 – 33. **10.** *Лурье Ю. Ю.* Аналитическая химия промышленных сточных вод. [Текст] / Ю. Ю. Лурье // М.: Химия, 1984. – 448 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Kupchik L. A., Nikolajchuk A. A., Borovic'kij N. Ju.* (2010). Osoblivosti sorbcii joniv vazhkih metaliv iz sol'ovih rozchiniv lignoceljuloznimi sorbentami Visnik NTUU «KPI», 2. 60 – 63. **2.** *Vegeera A. I., Elyshin A. I., Volkov V. K., Zharkova O. N.* (2000). Sravnitel'nyj analiz otechestvennyh i zarubezhnyh fil'tromaterialov. Vesti PGU – Prikladnye nauki. 69 – 74. **3.** *Eremin V. V.* (2009). Uglerodnye nano-materialy. J. Himija, 20, 32 – 41. **4.** *Bogatyreva G. P., Marinich M. A., Bazalij G. A., Il'nickaja G. D.* (2010). Adsorbcionnye processy v biologicheskikh seredah na poverhnosti almaznyh nanoporoshkov novyh marok // Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii. Vol. 8, 4, 851 – 859 **5.** *Novikov N. V., Danilenko V. V., Bogatyreva G. P., Padalko V. I.* (2010). Nanoalmazy: sintezy, svojstva, primenenie. Mezhdunarodnaja akademija KONTENANT. 4 – 22. **6.** *Antonenko L. P., Chuchulina N. V., Bogatyrjova G. P., Marinich M. G., Il'nickaja G. D., Demyshok T. I.* (2011). Poluchenie fil'troval'nogo materiala s ispol'zovaniem nanomaterialov dlja ochistki stokov ot tjazhjolih metallov. J. Jenergotehnologii i resursosberezhenie, 6, 49 – 54. **7.** *Antonenko L. P., Chuchulina N. V., Hohotva O. P., Demishok T. I., Bozhenko O. M.* (2011). Ochishhennja vodi vid ioniv midi nanoparoshkami almazu. Visnik NTUU «KPI». 1(7), 80 – 83. **8.** *Bogatyreva G. P., Il'nickaja G. D., Antonenko L. P., Leshhenko O. V.* (2012). Povyshenie fil'trujushhej sposobnosti bumazhnyh fil'trov. Sbornik nauchnyh trudov XIX mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Jekologicheskaja i tehnogennaja bezopasnost'. Ohrana vodnogo i vozdushnogo bassejnov. Utilizacija othodov». Berdjansk (Ukraine) 90 – 100. **9.** *Zadniprovanets Y. N., Babich A. Y., Antonenko L. P.* (2013). Obtaining a filter material with applying nano-powder of diamond. International Youth Science Environmental Forum “Ecobaltica ‘ 2013” St.-Peterburg (Russia), 29 – 33. **10.** *Lur'e Ju. Ju.* Analiticheskaja himija promyshlennyh stochnyh vod. (1984).- Moscow: Himija, 448.

Надійшла (received) 11.12.2014

О. В. СОБОЛЬ, д-р фіз.-мат. наук, проф., зав. каф., НТУ «ХПІ»;
А. О. АНДРЕЄВ, д-р техн. наук, провід. наук. співроб., ННЦ «ХФТІ», Харків;
І. В. СЕРДЮК, інженер-дослідник, ННЦ «ХФТІ», Харків;
В. Ф. ГОРБАНЬ, д-р техн. наук, провід. наук. співроб., Інститут проблем матеріалознавства НАН України, Київ;
Н. В. ПІНЧУК, аспірант, НТУ «ХПІ»;
А. О. МЕЙЛЕХОВ, аспірант, НТУ «ХПІ»;
Є. О. ДУМА, студент, НТУ «ХПІ»;
Д. М. БАБЕЦ, студент, НТУ «ХПІ»

ВПЛИВ ТИСКУ РОБОЧОЇ АТМОСФЕРИ НА ФОРМУВАННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ZrN ТА (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb)N

Методами рентгенівської тензометрії, електронної мікроскопії, в поєднанні з вимірюванням механічних характеристик мікроіндентуванням вивчено можливості структурної інженерії покриттів ZrN та (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb)N шляхом впливу тиску робочої атмосфери при осадженні покриттів на їх структуру та властивості. Встановлені умови одержання, які призводять до формування надтвердих покриттів з твердістю понад 40 ГПа.

Ключові слова: нітрид цирконію, нітрид високоентропійного сплаву, вакуумно – дуговий випар, покриття, структура, субструктура, мікротвердість.

Вступ. Основне призначення зносостійкого покриття на лезовому інструменті – це збільшення продуктивності матеріалу основи за рахунок можливості роботи з високими швидкостями різання і подачами. Для того щоб отримати покриття з необхідними властивостями, важливим є розуміння можливості структурної інженерії шляхом варіювання параметрів при осадженні [1–5].

Мета роботи. Метою даної роботи було проаналізувати можливості структурної інженерії покриттів одно- та багатеlementних по металевим складовим нітридів на основі Zr, отриманих при різному тиску робочої атмосфери.

Умови отримання та дослідження покриттів. Зразки були отримані при використанні модернізованої вакуумно-дугової установки «Булат-6», яка була додатково забезпечена генератором високовольтних імпульсів [6 – 8]. При нанесенні на підкладки з нержавіючої сталі 12Х18Н9Т з розмірами 20x20x3 мм і мідної фольги товщиною 0,2 мм подавали від'ємний потенціал зміщення величиною U_b від 27 В до 300 В.

Фазовий склад і структурний стан покриттів досліджувався методом рентгенівської дифракції на дифрактометрі ДРОН-4 у випромінюванні $Cu-K_{\alpha}$. Для розшифровки дифрактограм використовувалася база дифракційних даних JCPDS. Розмір кристалітів визначався по розширенню перших дифракційних ліній (для найменшого впливу мікродеформації) знятих при найменшому кроці сканування 0,02 град. із співвідношення Селякова-Шеррера [9]. Мікроіндентування проводили на установці «Мікрон-гамма» [10] при кімнатній температурі (навантаження в межах до 0,5 Н) алмазною пірамідою Берковича.

Результати дослідження та їх обговорення. Структура, субструктура та твердість ZrN покриттів. Як свідчать одержані рентгендифракційні спектри (рис. 1, а) при тиску $5 \cdot 10^{-4}$ Торр та вище формується однофазний стан ZrN з кубичною решіткою типа NaCl (JCPDS 35-0753) з переважною орієнтацією кристалітів (текстурою) [111]+[311] при $P_N = 5 \cdot 10^{-4}$ Торр (бітекстурний стан) та текстурою [111] при більш високому тиску. Ступінь текстурованості [111] з ростом тиску дещо збільшується (відносна інтенсивність текстурних піків посилюється відносно інших площин).

Повне дослідження покриттів включає в себе визначення механічних характеристик, а саме зміну твердості.

На рис. 1 (б) приведена залежність зміни твердості від тиску, з якої видно, що в кореляції зі структурними даними залежність твердості від тиску можна розділити на дві характерні ділянки. Перша ділянка до $8 \cdot 10^{-4}$ Торр з неперервним ростом твердості зі збільшенням тиску, що можна пов'язати з насиченням при цьому зв'язків азотними атомами в умовах формування бітекстурного стану, на

якому твердість зростає до 42 ГПа і друга – на котрій при більшому тиску твердість залишається практично постійною на рівні 37-38 ГПа.

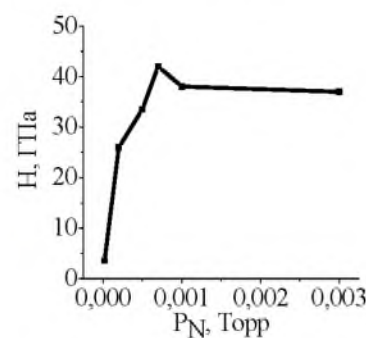
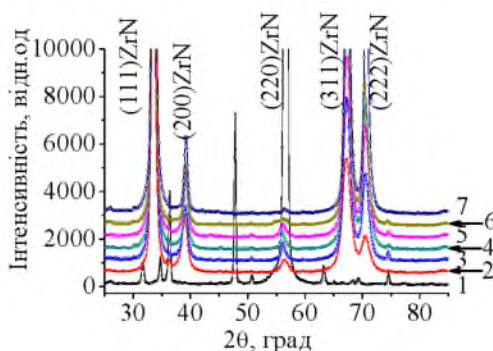


Рис. 1 – Ділянки рентгенограм та механічні властивості покриттів ZrN, отриманих при постійному від'ємному потенціалі -150 В і різному тиску азотної атмосфери (P_N), Торр: 1 – $2 \cdot 10^{-5}$; 2 – $2 \cdot 10^{-4}$; 3 – $5 \cdot 10^{-4}$; 4 – $7 \cdot 10^{-4}$; 5 – $1 \cdot 10^{-3}$; 6 – $3 \cdot 10^{-3}$; 7 – $4,8 \cdot 10^{-3}$; а – дифракційні спектри, б – твердість

Аналіз субструктурних характеристик приведений на рис. 2 показав, що при низькому тиску, коли відбувається формування стану

твердого розчину Zr(N), нижчого нітриду цирконію або нітриду цирконію з кубичною решіткою та біаксальною текстурою (тобто до тиску $1 \cdot 10^{-3}$ Торр) спостерігається загальна тенденція зменшення мікродеформації (рис. 2, а) та розміру кристалітів (рис. 2, б) з ростом тиску. Це може бути зумовлене зменшенням середньої енергії часток в наслідок зменшення довжини вільного пробігу часток. Збільшення тиску в цій області значень (тобто до тиску $1 \cdot 10^{-3}$ Торр) призводить до збільшення кількості місць утворення, отже призводить к зменшенню середнього розміру кристалітів при їх планарному заповненні з утворенням суцільної плівки (рис. 2, б). Це пояснюється невисоким ступенем хімічної взаємодії в процесі осадження без додаткової імпульсної стимуляції.

Друга ділянка при тисках більше $1 \cdot 10^{-3}$ Торр характеризується виходом залежності мікродеформації на практично постійний рівень 0,50–0,55 % і значне зростання розміру кристалітів у напрямку падіння плівкоутворюючих часток. При більшому тиску, коли відбувається формування текстури з переважною орієнтацією [111] ступінь досконалості, якої зі збільшення тиску підвищується,

величина середнього розміру кристалітів підвищується. Хід залежностей субструктурних характеристик, що спостерігається при великому тиску, можна пов'язати з повним насиченням покриття, що формується, атомами азоту до стехіометричного та свехстехіометричного складу. Останнє визначає досягнення постійного значення мікродеформації решітки та підвищення стійкості більш великих розмірів кристалітів.

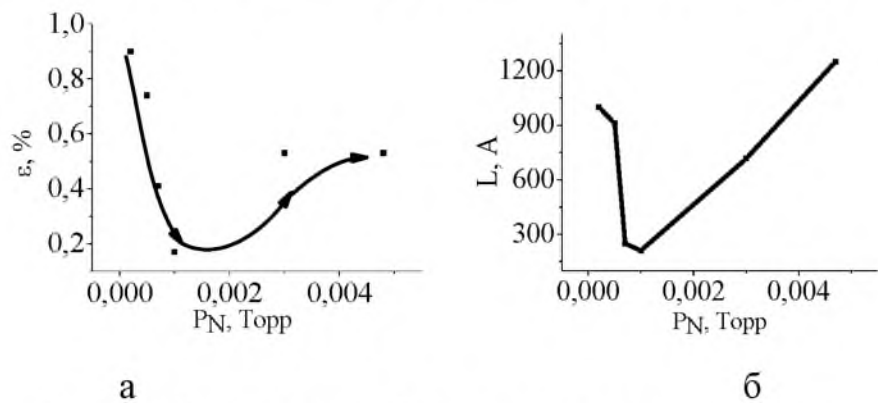


Рис. 2 – Залежність субструктурних характеристик покриттів ZrN від тиску робочої атмосфери, при отриманні покриттів у без імпульсному режимі, при $U_b = -150 \text{ В}$: а – мікродеформація, б – розмір кристалітів

Структура, субструктура та твердість високоентропійних сплавів (TiVZrNbHfTa)N. Для нітриду шестиелементного сплаву, отриманого в умовах $U_b = -200 \text{ В}$ (рис. 3) відзначимо формування при низькому тиску текстури (311) – досить стійкої до радіаційного впливу. Ця текстура зберігається до відносно високого тиску $2 \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$. При більшому тиску відбувається формування бітекстурного стану з основною текстурою росту (111) – рис. 3 (спектр 5). Однак ступінь досконалості такої текстури невеликий, що можна пов'язати з розорієнтовною дією різних за розміром атомів складових шестиелементного нітриду.

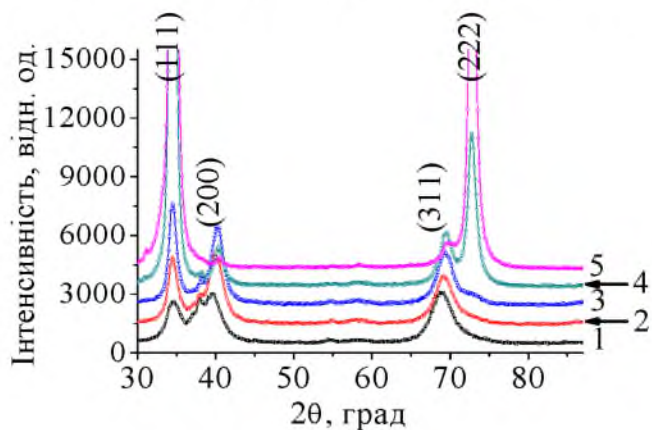


Рис. 3 – Ділянки дифракційних спектрів нітридних покриттів шестиелементного високоентропійного сплаву, отриманих при $U_b = -200 \text{ В}$ і при тиску азотної атмосфери ($p(N)$) Торр: 1 – $2,5 \cdot 10^{-4}$, 2 – $5 \cdot 10^{-4}$, 3 – $7 \cdot 10^{-4}$, 4 – $2 \cdot 10^{-3}$, 5 – $4,5 \cdot 10^{-3}$

Результати аналізу субструктурних характеристик, проведеного для покриттів, наведені на рис. 4.

Видно, що зі збільшенням тиску підвищується середній розмір кристалітів (рис. 4, а) і зменшуються мікродеформації (рис. 4, б). Причому збільшення розміру кристалітів більш виражене при меншому потенціалі -70 В , а зниження мікродеформації сильніше виявляється при потенціалі -200 В .

Отримані методом динамічного індентування фізико-механічні характеристики покриттів (модуль пружності (E) і мікротвердість (H)) залежно від тиску узагальнені на рис. 5.

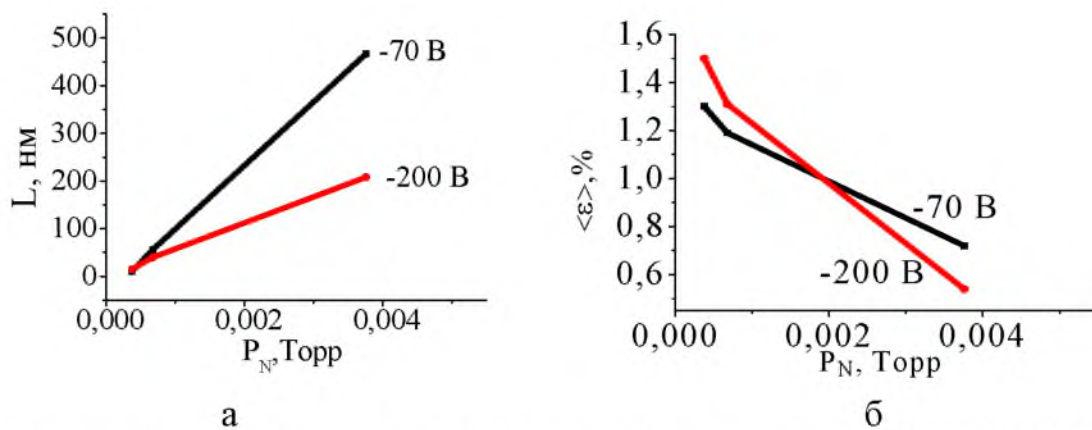


Рис. 4 – Залежність субструктурних характеристик покриттів (TiVZrNbHfTa)N від PN: а – розмір кристалітів, б – мікродеформація

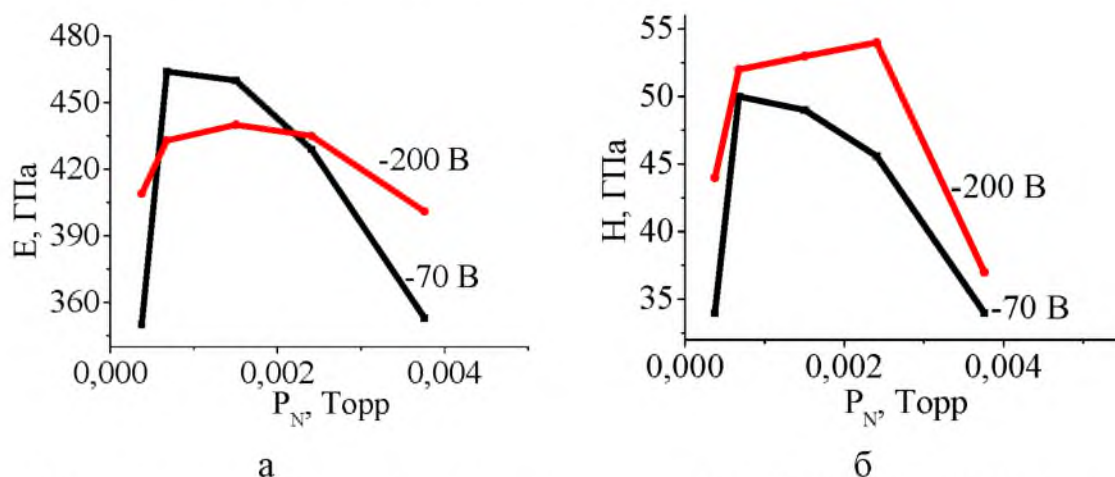


Рис. 5 – Фізико-механічні характеристики покриттів (TiVZrNbHfTa)N в залежності від тиску: а – модуль пружності (E), б – мікротвердість (H)

Найбільші значення даних характеристик отримані для порівняно невисокого тиску $0,09 \text{ Па}$ ($7 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$). Як відомо, для нітриду титану саме присутність 10–15 % вільних (не зайнятих азотом) октаедричних міжвузлів забезпечує найвищу твердість, в результаті процесу впорядкування і утворення стійких Me-N зв'язків.

Висновки

1. Методом вакуумно-дугового осадження були отримані однофазні покриття ZrN з кристалічною ГЦК решіткою.

2. З ростом тиску від $1 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ Торр та за умов від'ємного потенціалу зсуву -150 В спостерігаємо появу бітекстурного стану $[111] + [311]$ та текстуру росту $[111]$ при більш високому тиску.

3. Твердість зростає зі збільшенням тиску та досягає при тиску $5 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$ значення 42 ГПа . Таке збільшення твердості, можна пов'язати з насиченням при цьому зв'язків азотними атомами в умовах підвищення тиску азоту при осадженні та з формуванням бітекстурного стану.

4. Встановлено, що багатоелементні покриття, на основі твердого розчину (Zr, Hf, Nb, Ti, V), осаджені в азотній атмосфері є однофазними з фазою на основі кубічної ГЦК решітки (структурний тип NaCl).

5. Використання багатоелементного складу при однофазному стані з простою кубічною решіткою дозволяє досягати високих значень мікродеформації (до 1,2%) при низькому тиску осадження.

6. При тиску азотної атмосфери ($6,7 \cdot 10^{-4}$... $15 \cdot 10^{-4}$) Торр формуються наноструктурні покриття з надвисокою твердістю, які відповідають складу $\text{MeN}_{0,9}$. Найбільша твердість 54 ГПа властива покриттям з розміром кристалітів близьким до 50 нм при формуванні двохвісного текстурованого стану (111) + (311).

Список літератури: 1. *Азаренков Н. А.* Материаловедение неравновесного состояния модифицированной поверхности [Текст] / *Н. А. Азаренков, О. В. Соболев, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, С. В. Литовченко, О. Н. Иванов* // Сумы: Сумской государственной университет. – 2012. – С. 683. 2. Наноструктурные покрытия [Текст] / Под ред. А. Кавалейро и Д. де Хоссона. – М.: Техносфера. – 2011. – С. 792. 3. *Hua, M.* Tribological behaviours of patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel coated with different bias voltages [Text] / *M. Hua, H. Y. Ma, J. Li, C. K. Mok* // Surf. Coat. Technol. – 2006. PP. – 3612–3625. 4. *Sobol', O. V.* Vacuum-arc multilayer nanostructured TiN-Ti coatings: structure, stress state, properties [Text] / *O. V. Sobol', A. A. Andreev, S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, V. F. Gorban'* // Metal Science and Heat Treatment. – Vol. 54. – Nos. 1 – 2. – May 2012. – P. 28–33. 5. *Sobol', O. V.* Reproducibility of the single-phase structural state of the multielement high-entropy Ti–V–Zr–Hf system and related superhard nitrides formed by the vacuum-arc method [Text] / *O. V. Sobol', A. A. Andreev, V. F. Gorban', N. A. Krapivka, V. A. Stolbovoi, I. V. Serdyuk, V. E. Fil'chikov* // Technical Physics Letters. – 2012. – Vol. 38. – No. 7. – P. 616–619. 6. *Sobol', O. V.* Effect of high-voltage pulses on the structure and properties of titanium nitride vacuum-arc coatings [Text] / *O. V. Sobol', A. A. Andreev, S. N. Grigoriev, V. F. Gorban', M. A. Volosova, S. V. Aleshin, V. A. Stolbovoi* // Metal Science and Heat Treatment July 2012, Vol. 54, Issue 3-4, PP. 195–203. 7. *Соболев, О. В.* Механические характеристики, структура и напряженное состояние вакуумно-дуговых TiN-покрытий, осажденных при подаче на подложку высоковольтных импульсов в процессе осаждения [Текст] / *О. В. Соболев, А. А. Андреев, С. Н. Григорьев, В. Ф. Горбань, М. А. Волосова, С. В. Алешин, В. А. Столбовой* // Вопросы атомной науки и техники Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – №4 (98). – С. 174-177. 8. *Андреев, А. А.* Вакуумно-дуговые покрытия [Текст] / *А. А. Андреев, Л. П. Саблев, С. Н. Григорьев* // – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – С. 317. 9. *Палатник, Л. С.* Механизм образования и субструктура конденсированных пленок [Текст] / *Л. С. Палатник, М. Я. Фукс, В. М. Косевич.* М.: Наука. – 1972. – С. 320. 10. *Фирстов, С. А.* Упрочнение и механические свойства литых высокоэнтропийных сплавов [Текст] / *С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Н. А. Кративка, Э. П. Печковский* // Композиты и наноструктуры. – 2011. – № 2. – С. 5 – 20.

Bibliography (transliterated): 1. *Azarenkov, N. A., Sobol', O. V., Beresnev, V. M., Pogrebnyak, A. D., Lytovchenko, S. V., Ivanov, O. N.* (2012). Materials Science nonequilibrium state modified surface., 683. 2. Nanostructured coatings (2011). Ed. Cavaleiro A. and D. de Hossona, 792. 3. *Hua, M., Ma, H. Y., Li, J., Mok, C. K.* (2006). Tribological behaviours of patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel coated with different bias voltages. Surf. Coat. Technol, 3612–3625. 4. *Sobol', O. V., Andreev, A. A., Grigoriev, S. N., Volosova, M. A., Gorban', V. F.* (2012). Vacuum-arc multilayer nanostructured TiN-Ti coatings: structure, stress state, properties. Metal Science and Heat Treatment, Vol. 54, 1 – 2, 28–33. 5. *Sobol', O. V., Andreev, A. A., Gorban', V. F., Krapivka, N. A., Stolbovoi, V. A., Serdyuk, I. V., Fil'chikov, V. E.* (2012) Reproducibility of the single-phase structural state of the multielement high-entropy Ti–V–Zr–Hf system and related superhard nitrides formed by the vacuum-arc method. Technical Physics Letters, Vol. 38, № 7, 616–619. 6. *Sobol', O. V., Andreev, A. A., Grigoriev, S. N., Gorban', V. F., Volosova, M. A., Aleshin, S. V., Stolbovoi, V. A.* (2012) Effect of high-voltage pulses on the structure and properties of titanium nitride vacuum-arc coatings. Metal Science and Heat Treatment, Vol. 54, Issue 3-4, 195–203. 7. *Sobol', O. V., Andreev, A. A., Grigoriev, S. N., Gorban', V. F., Volosovo, M. A., Aleshin, S. V., Stolbovoi, V. A.* (2011) Mechanical properties and stress state of the structure of the vacuum-arc TiN-coatings deposited at high voltage pulses is applied to the substrate

during the deposition. Problems of Atomic Science and Technology, №4 (98), 174-177. **8.** Andreev, A. A., Sablev, L. P., Grigoriev, S. N. (2010). Vacuum-arc coating. Kharkov: KIPT, 317. **9.** Palatnik, L. S., Fuchs, M. J., Kosevich, V. M. (1972) The mechanism of formation and substructure condensed films, 320. **10.** Firstov, S. A., Gorban', V. F., Krapivka, N. A., Pechkovsky, E. P. (2011). Hardening and mechanical properties of high entropy cast alloys. Composites and Nanostructures, № 2, 5 – 20.

Надійшла (received) 13.12.2014

УДК 666.762

О. Б. СКОРОДУМОВА, д-р техн. наук, проф., Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков;

А. Ю. ЛОЗОВСКОЙ, ассистент, УИПА, Харьков;

Е. В. ТАРАХНО, канд. хим. наук, зав. каф., Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков;

Т. Б. ГОНТАР, ст. преп., УИПА, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ГИБРИДНЫХ ГЕЛЯХ КРЕМНЕЗЕМА С ПОНИЖЕННОЙ СКЛОННОСТЬЮ К АГРЕГИРОВАНИЮ

1. Исследовано влияние основных технологических параметров получения на гидрофобизацию поверхности частиц гибридных гелей SiO_2 и склонность их к агрегированию. Изучено влияние технологических особенностей проведения золь-гель перехода на механизм гелеобразования в гибридных гелях системы метилтриэтоксисилан – тетраэтоксисилан, в условиях переменного pH. Установлено, что для получения тонких порошков в высокой текучестью и низкой склонностью к агрегированию необходимо проводить коагуляцию готового гидролизата МТЭОС/ТЭОС= 2/1 при pH 9 через 0,5ч. после приготовления.

Ключевые слова: метилтриэтоксисилан, тетраэтоксисилан, гидролиз, поликонденсация, механизм гелеобразования, склонность к агрегированию

Введение. Кремнеземистые порошки нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Особенно актуально использование высокодисперсных порошков SiO_2 . Такие порошки с успехом используются в фармацевтической промышленности в качестве наполнителей для таблетированных лекарственных форм и саше (различные аэросилы), сорбентов (гели поликремниевой кислоты и порошковые ксерогели SiO_2), а также наполнителей стоматологических композиционных материалов (аморфный SiO_2 , кварцевые, кристобалитовые порошки, аэросилы различных марок) [1-3].

Основными показателями качества этих порошков являются: чистота, высокие дисперсность и текучесть, пониженная электризуемость. Первое, самое важное качество – чистота – диктует выбор золь-гель технологии, позволяющей не загрязнять исходные чистые компоненты в процессе их переработки.

На сегодняшний день экономически обоснована необходимость разработки технологии кремнеземистых порошков с заданными физико-химическими и физико-механическими свойствами полифункционального назначения.

Заданный фазовый состав и высокую дисперсность наиболее легко получать из кислых гелей этилсиликата [4]. Форма частиц порошка программируется

© О. Б. СКОРОДУМОВА, А. Ю. ЛОЗОВСКОЙ, Е. В. ТАРАХНО, Т. Б. ГОНТАР, 2014

видом, количеством и концентрацией комбинированного кислотного-основного катализатора гидролиза этилсиликата или тетраэтоксисилана [5]. Высокая текучесть порошка достигается путем модифицирования поверхности частиц гидрофобным кремнийорганическим соединением, однако при этом возрастает и электризуемость порошка [6].

Принимая во внимание первые результаты, полученные при исследовании гибридных гелей системы тетраэтоксисилан – метилтриэтоксисилан [7-10], представляется целесообразным изучить влияние технологических параметров перехода «золь-гель» на склонность к агрегированию кремнеземистого порошка.

Цель работы. Целью работы являлось исследование влияния основных технологических параметров получения на гидрофобизацию поверхности частиц гибридных гелей SiO_2 и склонность их к агрегированию.

Методика экспериментов. Для исследований использовали тетраэтоксисилан (ТЭОС) и метилтриэтоксисилан (МТЭОС) марки о.с.ч. В качестве катализатора гидролиза кремнийорганических соединений использовали концентрированную соляную кислоту. Переход в щелочную область гидролиза и коагуляцию осуществляли с помощью раствора NaOH . Гидролиз ТЭОС протекает в течение 30-35 мин. Наличие в структуре МТЭОС метильной группы значительно ускоряет гидролиз этоксильных групп: начало реакции, сопровождаемое резким увеличением температуры, фиксируется уже через 10-15 сек после начала перемешивания исходных компонентов, а общее время гидролиза составляет 10 мин. Составы и свойства экспериментальных гелей приведены в табл.1.

Степень однородности гибридного геля, а также степень гидрофобности поверхности кремнеземистого наполнителя оценивали косвенно, измеряя величину адсорбционной активности поверхности частиц кремнеземистого порошка с помощью спектрофотометра Spereord 200 PC. Текучесть порошков оценивали по времени истечения навески порошка через градуированную воронку.

Таблица 1 – Составы и свойства экспериментальных гелей и порошков из них

№ п/п	Состав, масс. %							Время коагуляции, ч	Адсорбц. активность, мкмоль/г
	МТЭОС	ТЭОС	спирт	вода	HCl	МТЭОС/ТЭОС	pH коагуляции		
1 ₂	21,81	21,81	42,95	12,86	0,45	1/1	9	0,5	5,4
1 ₁							11		9,9
2 ₁	29,25	14,62	43,31	12,37	0,45	2/1	9	12	Порошок гидрофобен
2 ₂							11		
3 ₁	29,25	14,62	43,31	12,37	0,45	2/1	9	0,5	19,5
3 ₂							11		18,2
4 ₁	32,62	11,25	43,31	12,37	0,45	3/1	9	0,5	9,4*
4 ₂							11		9,6*
5 ₁	34,87	9,0	43,31	12,37	0,45	4/1	9	0,5	1,1*
5 ₂							11		Порошок гидрофобен

* Порошок плохо смачивается водой

Увеличение соотношения МТЭОС/ТЭОС в исходном гидролизате приводило к улучшению сорбционных характеристик кремнеземистых гелевых порошков, повышению их текучести, увеличению дисперсности и снижению объемного веса.

Учитывая, что реакция гидролиза кремнийорганических соединений протекает параллельно и последовательно процессу поликонденсации продуктов гидролиза, представляется целесообразным изучить механизм превращений в экспериментальных золях, приводящих к гелеобразованию, при переходе рН из кислой области значений в щелочную, с помощью инфракрасной спектроскопии (инфракрасный Фурье спектрометр Tensor 27).

Обсуждение результатов исследований. Скорость гидролиза чистого ТЭОС значительно ниже скорости процесса поликонденсации продуктов и полупродуктов гидролиза. Известно, что наиболее эффективным катализатором гидролиза ТЭОС являются сильные кислоты. Однако в присутствии кислотного катализатора также значительно активизируется процесс поликонденсации, поэтому частично гидролизованные молекулы ТЭОС образуют полиэтоксисилоксаны.

Следует также принимать во внимание параллельно протекающие процессы поликонденсации полностью гидролизованных (благодаря влиянию CH_3 -групп) молекул МТЭОС, которые конденсируются с образованием полиметилкремниевой кислоты.

Таким образом, совместный гидролиз смеси МТЭОС и ТЭОС приводит к образованию гибридного, крайне неоднородного по объему, геля.

На рис. 1 представлена зависимость интенсивности характеристических полос поглощения поликремниевых кислот от соотношения МТЭОС/ТЭОС в исходном гидролизате. С увеличением содержания МТЭОС в исследуемых гелях, полученных при рН коагуляции 9, наблюдается резкое снижение интенсивности полосы при 1050 см^{-1} , соответствующей колебаниям связи Si-O. На ИК-спектрах эта полоса становится более широкой, что свидетельствует об образовании не только сетчатых полисилоксанов, но и линейных.

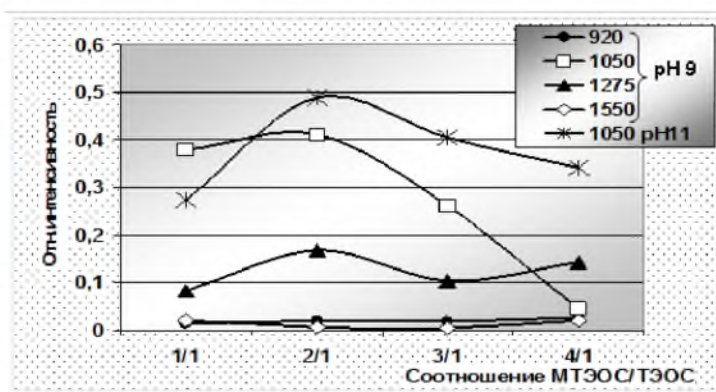


Рис. 1 – Изменение интенсивности характеристических полос поглощения в зависимости от соотношения МТЭОС/ТЭОС

Интенсивность полосы при 1050 см^{-1} на ИК-спектрах гелей, полученных коагуляцией при рН 11, несколько выше, чем у гелей, полученных при рН9, что свидетельствует о более высокой степени поликонденсации. Обе кривые имеют максимум при соотношении МТЭОС/ТЭОС=2/1. Интенсивность характеристических полос поглощения колебания связей SiOH (920 см^{-1}), C-H в группе CH_3 (1273 см^{-1}), Si-OC₂H₅ (1550 см^{-1}) изменяется незначительно. На каждой кривой также присутствует слабо выраженный максимум в области МТЭОС/ТЭОС=2/1. При этом соотношении исходных компонентов на

интенсивность характеристических полос поглощения оказывает влияние не только pH, но и время коагуляции. Как видно из рисунка, наивысшая степень поликонденсации (т. е. количество образующихся связей Si-O) наблюдается при pH коагуляции 11, проведенной через 0,5ч. после завершения стадии гидролиза. Однако полученные порошки геля были абсолютно гидрофобны, содержали большое количество агрегатов, а преобладающий размер частиц порошка был вдвое выше, чем в порошках, полученных при pH9.

В связи с этим для получения более подробной информации о процессах, протекающих при золь-гель переходе в исследуемых золях рассчитывали отношение интенсивностей характеристических полос поглощения колебания связей Si-O, Si-OH, C-H (CH₃), Si-OC₂H₅ как косвенные характеристики (рис. 2):

а) степени завершенности гидролиза ($I_{\text{SiOH}}/I_{\text{Si-OC}_2\text{H}_5}$);

б) содержания полиэтоксисилоксанов в сетчатой структуре геля ($I_{\text{Si-OC}_2\text{H}_5}/I_{\text{Si-O}}$);

в) распределения гидрофобизирующих групп на поверхности глобул геля, покрытых силанольными группами ($I_{\text{CH}_3}/I_{\text{Si-OH}}$);

г) распределения гидрофобизирующих групп в структуре кремнекислородного каркаса геля ($I_{\text{CH}_3}/I_{\text{SiO}}$).

Кривая изменения отношения интенсивностей полос $I_{\text{SiOH}}/I_{\text{Si-OC}_2\text{H}_5}$ имеет перегиб в области МТЭОС/ТЭОС = 2/1 – 3/1 (pH9), что согласуется с минимумом в этой области на кривой $I_{\text{Si-OC}_2\text{H}_5}/I_{\text{Si-O}}$ (рис. 2, а). По-видимому, при повышении содержания МТЭОС в исходной смеси реакция поликонденсации полностью гидролизованного МТЭОС опережает реакцию гидролиза ТЭОС и инициирует совместную поликонденсацию полупродуктов гидролиза ТЭОС и олигомеров

низкой молекулярной массы, полученных из МТЭОС. В результате такого процесса часть этоксильных групп встраивается в силоксановый каркас, что на ИК-спектрах сопровождается повышением интенсивности полосы, соответствующей колебаниям связи Si-OC₂H₅ в полиэтоксисилоксанах (рис. 2, б).

Группы CH₃ достаточно равномерно

распределены на поверхности глобул геля, поэтому кривая $I_{\text{CH}_3}/I_{\text{SiO}}$ в интервале МТЭОС/ТЭОС = 2/1 – 4/1, изменяется незначительно (рис.2,б). Однако соотношение групп CH₃ и Si-OH заметно изменяется при увеличении соотношения МТЭОС/ТЭОС до 3/1 – 4/1 (рис. 2, а), что, по-видимому, связано с

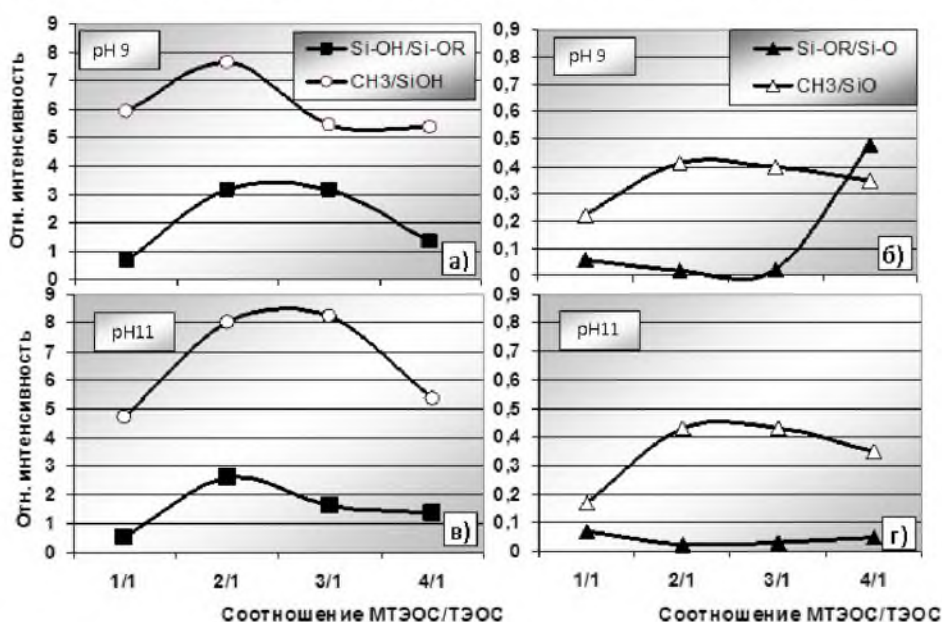


Рис. 2 – Изменение соотношения функциональных групп в гибридных гелях в зависимости от содержания МТЭОС

активной конденсацией поверхностных силанольных групп, приводящей к образованию агрегатов.

При более жестких условиях коагуляции (рН 11) описанные процессы идут значительно быстрее, что приводит к получению крайне неоднородного порошка гибридного геля.

Выводы. Характер кривых, наличие максимума в области МТЭОС/ТЭОС = 2/1 – 3/1 позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

2. Присутствие МТЭОС в исходной смеси не ускоряет гидролиз ТЭОС.

3. Для получения гибридного геля оптимальным является соотношение МТЭОС/ТЭОС = 2/1, так как при этом значении в геле находится минимальное количество не прореагировавших этоксильных групп тетраэтоксисилана.

4. Увеличение содержания МТЭОС в смеси приводит к активизации совместной поликонденсации продуктов и полупродуктов гидролиза МТЭОС и ТЭОС и, как следствие, образованию клатратов в структуре геля и объединению глобул геля в крупные агрегаты.

5. Для получения тонких порошков в высокой текучестию и низкой склонностью к агрегированию необходимо проводить коагуляцию готового гидролизата МТЭОС/ТЭОС= 2/1 при рН 9 через 0,5ч. после приготовления.

Список литературы: 1. *Корубо, Т.* Керамические биоматериалы [Текст] / *Т. Корубо* // Химия.- 1988.- 43.-№1.- с.66-67. 2. *Dickerson, W. G.* The fiber-reinforced in lay-supported indirect composite bridge [Text] / *W. G. Dickerson, P. Rmaldi* // Pract.Periodont. Aestet.Dent.- 1996.- v. 7.- P.1-4. 3. *Почерняев, А. И.* Новое в композитных технологиях для стоматологии [Текст] / *А. И. Почерняев, В. К. Шевченко, В. С. Москаленко* // Стоматолог.- 1998.- №3.-С.46-52. 4. *Слинякова, И. Б.* Кремнийорганические адсорбенты: Получение, свойства, применение [Текст] / *И. Б. Слинякова, Т. И. Денисова* - Киев: Наукова думка, 1988.- 192с. 5. *Скородумова, О. Б.* Физико-механические свойства композиционных материалов на основе керамического наполнителя и полимерной матрицы [Текст] / *О. Б. Скородумова, И. В. Городничева, М. П. Качоманова* // Вестник Национального технического университета “ХПИ”.- Харьков, 2005.- №27.- с.37-42. 6. *Скородумова, О. Б.* Кристаллизация SiO₂ из гелей на основе этилсиликата [Текст] / *О. Б. Скородумова, Г. Д. Семченко, Я. Н. Гончаренко* // Стекло и керамика.- 2001.- №1.-С30-32. 7. *Скородумова, О. Б.* Термическое превращение этилсиликатных гелей в технологии кремнеземистых наполнителей стоматологических пластмасс [Текст] / *О. Б. Скородумова, Я. Н. Гончаренко, Л. В. Руденко* // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.- Харьков, 2000.- вып.123.-С81-84. 8. *Скородумова, О. Б.* Исследование процессов термодеструкции волокнообразующих золь этилсиликата методом ДТА [Текст] / *О. Б. Скородумова, И. Е. Кухарева, И. В. Шуба* // Вопросы химии и химической технологии.- 2009.- №6.- С.148 – 150. 9. *Скородумова, О. Б.* Исследование гибридных органо-неорганических золь SiO₂ – прекурсоров композиционных биокерамических материалов [Текст] / *О. Б. Скородумова, Я. Н. Гончаренко, Т. Б. Гонтар, И. В. Шуба* // Сб. научных трудов «Технология и применение огнеупоров и технической керамики в промышленности», Харьков:Каравелла.- 2010.- №110.- С.307-312. 10. *Скородумова, О. Б.* Влияние морфологии наполнителя на физико-механические свойства композиционных материалов для стоматологии [Текст] / *О. Б. Скородумова, М. П. Качоманова, И. В. Городничева* // Збірник наукових праць ВАТ „УкрНДІВогнетривів імені А.С.Бережного” - Харків, 2005.- № 105.- С.150-157.

Bibliography (transliterated): 1. *Korubo, T.* (1988). Keramicheskie biomaterialy. Ximiya, 43, 1, 66-67. 2. *Dickerson, W. G., Rmaldi, P.* (1996) The fiber-reinforced in lay-supported indirect composite bridge. Pract.Periodont. Aestet.Dent, 7, 1-4. 3. *Pochernyaev, A. I., Shevchenko, V. K., Moskalenko, V.*

S. (1998) Novoe v kompozitnyh tehnologiyah dlya stomatologii. Stomatolog, 3, 46-52. 4. *Slinyakova, I. B., Denisova, T. I.* (1988) Kremniorganicheskie adsorbenty: Poluchenie, svoystva, primenenie. Kiev. Naukova dumka, 192. 5. *Skorodumova, O. B., Gorodnicheva, I. V., Kachomanova, M. P.* (2005) Fiziko-mehaniicheskie svoystva kompozitsionnyh materialov na osnove keramicheskogo napolnitelya i polimernoi matricy. Vestnik Nacional'nogo tehniicheskogo universiteta "HPI", 27, 37- 42. 6. *Skorodumova, O. B., Semchenko, G. D., Goncharenko, Ya. N.* (2001) Kristallizatsiya SiO₂ iz gelei na osnove etilsilikata. Steklo i keramika, 1, 30-32. 7. *Skorodumova, O. B., Goncharenko, Ya. N., Rudenko, L. V.* (2000) Termicheskoe prevraschenie etilsilikatnyh gelei v tehnologii kremnezemistyh napolnitelei stomatologicheskikh plastmass. Vestnik Har'kovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta, 123, 81- 84. 8. *Skorodumova, O. B., Kuhareva, I. E., Shuba, I. V.* (2009) Issledovanie processov termodestruktsii voloknoobrazuyuschih zolei etilsilikata metodom DTA. Voprosy himii i himicheskoi tehnologii, 6, 148 - 150. 9. *Skorodumova, O. B., Goncharenko, Ya. N., Gontar, T. B., Shuba I. V.* (2010). Issledovanie gibridnyh organo-neorganicheskikh zolei SiO₂ - prekursorov kompozitsionnyh biokeramicheskikh materialov. Sb.nauchnyh trudov "Tehnologiya i primenenie ogneuporov i tehniicheskoi keramiki v promyshlennosti". Har'kov. Karavella, 110, 307-312. 10. *Skorodumova, O. B., Kachomanova, M. P., Gorodnicheva, I. V.* (2005) Vliyanie morfologii napolnitelya na fiziko-mehaniicheskie svoystva kompozitsionnyh materialov dlya stomatologii. Zbirnik naukovih prac' VAT "UkrNDIVognetriviv imeni A.S.Berejnogo". Harkiv. Karavella, 105, 150-157.

Надійшла (received) 17.12.2014

УДК 669.15-198

Е. И. ЦЫБУЛЯ, канд. техн. наук, доц., НметАУ, Днепропетровск

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМО-АНТРАЦИТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА УГОЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены показатели качества антрацита, применяемого для производства угольной продукции, и их изменение в зависимости от температуры прокаливания. Проведен статистический анализ формы кусков антрацита до и после прокаливания и рассчитана их удельная поверхность. Предложено для повышения качества угольной продукции металлургического назначения использовать термоантрацит высокотемпературного прокаливания.

Ключевые слова: антрацит, термоантрацит, электродная масса, электрокальцинатор, прокаливание, температура, удельное электрическое сопротивление

Введение. Анализ многолетнего опыта производства ферросплавов показывает, что создание высокомошных электропечей неразрывно связано с разработкой одного из основных и ответственных элементов - непрерывных самообжигающихся электродов, высокая эксплуатационная стойкость которых определяет электрический, а, следовательно, и тепловой режим ведения плавки, мощность и производительность печи, удельный расход электроэнергии и другие технико-экономические показатели [1].

Известно, что с увеличением мощности электропечей и размеров электродов условия эксплуатации последних становятся все более жесткими, а закономерности формирования – более сложными, что обуславливает необходимость разработки и совершенствования составов и технологий производства электродных масс, осуществления систематического контроля

© Е. И. ЦЫБУЛЯ, 2014

условий работы электродов и принятия, необходимых мер, обеспечивающих повышение их надежности. При этом качественная составляющая конкурентоспособности товарной продукции (электродной массы, углеграфитовых изделий) во многом определяется качеством исходных (сырьевых) материалов и многими параметрами их подготовки для использования в технологии производства соответствующих изделий.

Анализ исследований, публикаций и постановка задачи. Термически обработанный антрацит - термоантрацит, широко используется в составе шихтовых смесей твердых углеродных компонентов для изготовления углеродной продукции. В современной промышленной практике термоантрацит получают прокаливанием антрацита в трубчатых вращающихся печах (ТВП) при температуре 1200-1350°C и электрокальцинаторах при 1600-2200°C [1].

Антрациты, используемые в составе электродной массы, должны иметь минимальное количество золы, серы, влаги и высокое содержание углерода, а также низкое удельное электрическое сопротивление (УЭС), высокую механическую прочность и термостойкость, которые определяют область их использования.

Поступающий с обогатительных фабрик антрацит подвергается термической обработке для улучшения комплекса физико-механических свойств и повышения термической стойкости, уменьшения электросопротивления и реакционной способности, повышения плотности структуры. Необходимость проведения процесса прокаливания, в первую очередь, подтверждается объёмной усадкой антрацита на 10-16 % при высокотемпературной обработке. В процессе прокаливания антрацита увеличивается количество углерода и снижается содержание летучих веществ [1, 2]. Кроме изменения элементного состава, при термообработке в результате протекания процессов структурообразования углеродного вещества повышается истинная плотность материала, снижается УЭС и реакционная способность, формируется пористая и вентрикристаллическая структура.

Основные принципиальные положения изменения структуры и технологических характеристик антрацита при прокаливании его обобщены в известной специалистам монографии Е. Ф. Чалых [2]. В последующие годы в работе [3] и др. изложены результаты теоретических разработок процессов трансформации структуры антрацита и выполнены многочисленные экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях, целью которых было установление парных и многофакторных зависимостей качества термоантрацита от геохимического и петрографического составов исходного антрацита (витринитовой и инертитовой групп), содержания минеральных примесей, скорости пиролиза и удаления летучих соединений, конечной температуры и продолжительности изотермической прокалики.

При определении пригодности антрацитов для получения термоантрацита для углеграфитовых изделий важным являются электрические характеристики, а конкретнее его УЭС, как функции температуры их прокаливания [3, 4].

М. Л. Улановский и др. [4] одними из первых исследовали электросопротивление антрацита в кусках и его связь с другими показателями. Результаты исследования свидетельствуют, что, при прочих равных параметрах

прокаливания антрацитов (температура, продолжительность прокалики), термоантрацит с более низким значением УЭС можно получить при условии, что исходный антрацит будет характеризоваться однородностью, меньшими значениями показателем ЭС_к.

Таким образом, из приведенного аналитического обзора литературных данных следует, что для решения задачи получения высококачественного термоантрацита необходима многопараметрическая оценка качества высокометаморфизованных антрацитов и комплексное исследование технологии его прокаливания для повышения качества углеродной продукции.

Выбор температурно-временных режимов прокаливания, наиболее пригодных для получения термоантрацита для электродной продукции витринитовых антрацитов, определяется с одной стороны необходимостью получения термоантрацита с более высокими показателями качества, а с другой – достижением высоких качественных показателей при меньших удельных расходах энергоносителей. В этом аспекте необходимо провести анализ процессов, происходящих в антраците при прокаливании, и новых научных поисков в области выбора агрегатов для промышленного производства термоантрацита. Это является актуальной задачей современной металлургии и обусловило проведение исследований и поиск решений, направленных на совершенствование технологических процессов получения термоантрацита со стабильно высокими показателями качества.

Изложение материала и результатов исследований. Процессы, происходящие при прокаливании высокометаморфизованного антрацита при повышении температуры, включают стадии последовательного превращения практически рентгеноаморфного органугольного вещества (со слабыми следами упорядоченности графитоподобных наночастиц) до упорядоченной структуры графита (рис. 1) [3, 5–8].

Известно, что на электропроводность антрацита существенное влияние оказывают самые различные параметры: температура прокаливания, зольность, размер кристаллитов, плотность, время обработки, давление и т.д. В работе [9] определена функциональная зависимость удельной электропроводности (УЭП) от температуры при постоянстве энергии активации процесса изменения УЭП термоантрацита. Авторы [8] указали, что экспериментальные данные по УЭП (σ) аппроксимируются уравнением

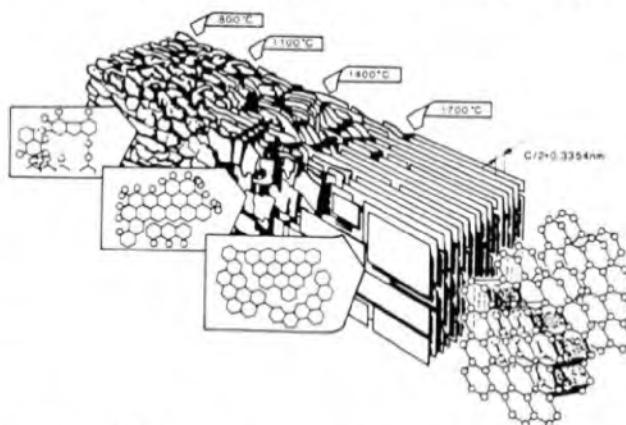


Рис. 1 – Общая схема последовательности структурных превращений антрацита с образованием графита [5, 6]

$$\sigma = b \tau^n \exp\left(-\frac{nE}{RT}\right),$$

где b , n – корреляционные постоянные, τ - время, E - кажущаяся энергия активации, T - абсолютная температура, R - универсальная газовая постоянная.

Проведенный в работе [10] статистический анализ данных [8] показал сходные результаты, хотя и с более низкой корреляцией (97,53%). Необходимо отметить, что параметр времени здесь является временем изотермической выдержки, а не продолжительностью прокаливания вообще. Поэтому более точное уравнение должно учитывать нелинейную скорость нагрева, а весь процесс должен описываться более точным интегральным кинетическим уравнением типа

$$\sigma = b \left(\int_{\tau_0}^{\tau} \exp\left(-\frac{E}{RT(\tau)}\right) d\tau \right)^n,$$

где учитывается зависимость температуры в данной точке от времени (τ_0 – время начала структурной перестройки антрацита). Расчетами [9] подтверждается предположение авторов [8] о том, что энергия активации электропроводности может быть принята постоянной в интересующем диапазоне температур. Энергия активации роста кристаллитов (382 кДж/моль) близка к энергии активации изменения электропроводности (336-340 кДж/моль [9]). Тем самым можно предполагать, что кинетика роста кристаллитов является определяющим фактором повышения удельной электропроводности.

К сожалению, надежное прямое экспериментальное определение УЭП антрацита при высоких температурах затруднительно – в частности авторами [9] показано влияние контактного давления, ведущее к вариации значений электропроводности антрацита на несколько порядков. Известно, что при изменении гранулометрического состава порошков существенно меняются площади и качество их контактов, и поэтому однозначная корреляция здесь вряд ли возможна (за исключением нескольких простых модельных случаев). В литературе также отсутствуют надежные данные о неравномерности гранулометрического состава и формы кусков антрацита внутри каждого класса крупности, что затрудняет интерполяцию подобных зависимостей на более узкие классы. Поэтому нами [10] с использованием программы обработки изображений «СигмаСкан 5», для антрацита до и после прокаливания (рис. 2) был проведен статистический анализ формы кусков и рассчитана их удельная поверхность в

приближении эллипсоидов (табл. 1) без учета внутренней пористости, рельефа и пр. Таким образом, при прокатке происходит практически удвоение удельной поверхности материала на единицу объема реакционного пространства. Сложность учета



Рис. 2 – Фото антрацита (слева) и термоантрацита (справа)

эффективных значений УЭП связана также с тем, что давление существенно влияет на площадь контакта между кусками антрацита и, следовательно, на величину эффективной электропроводности слоя. По данным [8] измерение УЭП производили при давлении 42,5 кг/см² (4,17 МПа), при этом изменение контактного давления оказывало сильное влияние на значения электропроводности. Обработкой экспериментальных данных [8, 11] в работе [10] получена зависимость величины эффективной электропроводности (ЭП) антрацита от контактного давления (рис. 3).

Таблица 1 – Параметры формы антрацита и термоантрацита
(средние величины ± стандартное отклонение)

Показатель	Антрацит	Термоантрацит
Средний эквивалентный диаметр, мм	32,5 ± 2,1	19,25 ± 5,7
Фактор формы φ	0,443 ± 0,047	0,369 ± 0,182
Средняя поверхность, мм ²	835 ± 106	323 ± 166
Средний объем, мм ³	16722 ± 2980	3404 ± 2411
Удельная поверхность куска, мм ² /мм ³ или в м ² /кг	0,050 ± 0,003 0,036	0,125 ± 0,070 0,067

Автором экспериментально исследовано влияние температуры в широком интервале от 1000°С до 2500°С на свойства термоантрацита. Высокотемпературную прокалку образцов производили в печи Таммана при скорости подъема температуры 30°С/минуту. Изотермическая выдержка образцов при достижении заданной температуры (с интервалом 300°С) составляла 1 час. Проведенные

исследования показывают, что с увеличением температуры термообработки антрацита уменьшается содержание золы и серы, увеличивается истинная плотность и снижается показатель УЭС согласно установленным зависимостям:

$$A^c = -1 \cdot 10^{-6} T^2 + 2.8 \cdot 10^{-3} T + 2.42;$$

$$S = -2 \cdot 10^{-7} T^2 + 0.1 \cdot 10^{-3} T + 1.08;$$

$$\gamma_{и} = 1 \cdot 10^{-7} T^2 - 0.3 \cdot 10^{-3} T + 1.95;$$

$$\phi = 0.7 \cdot 10^{-3} T^2 - 3.11 T + 3873.6.$$

где T - температура термообработки, °С; A^c - содержание золы, %; S - содержание серы, %; γ_и - истинная плотность, г/см³; φ - удельное электросопротивление, мкОм·м. Коэффициенты корреляции по приведенным зависимостям составили 0.99, 0.99, 0.94 и 0.97 соответственно, что говорит о высокой сходимости результатов регрессионного анализа.

Выводы и направления дальнейших исследований. Анализ литературных данных и проведенных кафедрой электрометаллургии Национальной металлургической академии Украины исследований подтверждает, что для достижения более высоких качественных характеристик термоантрацита прокаливание донецкого антрацита необходимо проводить при более высоких температурах, чем это достигается при прокаливании в ТВП. Очевидно, что для достижения более низких значений УЭС термоантрацита прокаливание антрацита необходимо производить в электротермических установках с высокой удельной объемной

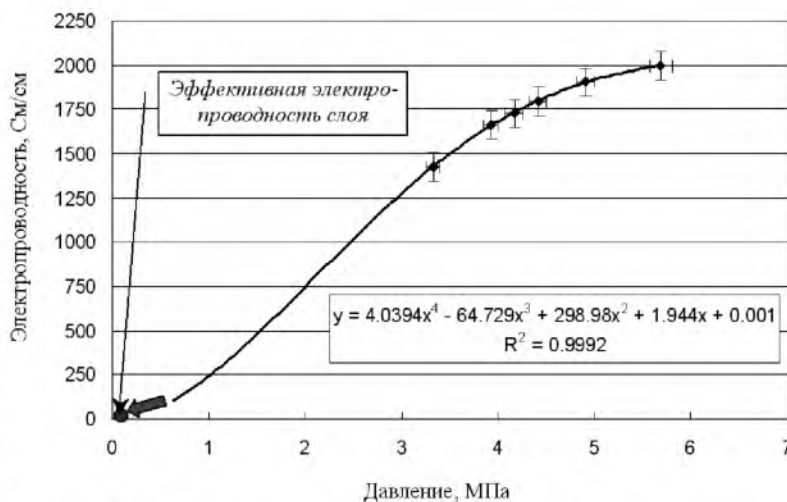


Рис. 3 – Зависимость ЭП (обработанного при 1600°С) от давления при измерении УЭП [11].
Экспериментальные точки – [8]

концентрации энергии. Этим условиям удовлетворяет применение электрокальцинаторов с превращением электрической энергии в тепловую, непосредственно в прокаливаемом антраците. При этом, выполненными автором исследованиями установлено, что электрокальцинированный термоантрацит в сравнении с термоантрацитом из ТВП, имеет на 30-40 % ниже показатель удельного электрического сопротивления, на 20-30 % меньше количество золы, на 5-10% большую истинную плотность и 10-15 % графитовой составляющей, что позволяет для улучшения характеристик углеродных изделий не применять дорогой и дефицитный графит.

Список литературы: 1. Гасик, М. И. Electroды рудовосстановительных печей [Текст] / М. И. Гасик. - М.: Metallurgy, 1984. - 248 с. 2. Чалых, Е. Ф. Технология углеграфитовых материалов [Текст] / Е. Ф. Чалых. - М.: Metallurgizdat, 1963. - 304 с. 3. Electrical conductivity of anthracites as a function of heat treatment temperature [Text] / A. Celzard, J. F. Mareche, F. Payot [and others] // Carbon. - 2000. - №38. - P. 1207-1215. 4. Электросопротивление антрацита в кусках и его связь с другими показателями [Текст] / М. Л. Улановский, Ю. В. Зингерман, С. Д. Меньшикова [и др.] // Химия твердого топлива. - 1989. - №6. - С. 95-99. 5. Brandtzoeg, S. R. Structural changes during calcinations of coke and antracite [Text] / S. R. Brandtzoeg // Doct. Thesis, Univ. Trondheim, Norway. - 1985. - №45. - 200 p. 6. Marsh, H. Structural changes of anthracite [Text] / H. Marsh // 14-th Bienn. Conf. On Carbon. - Pens., USA. - 1979 - P. 165. 7. Pusz, S. Textural transformation of thermally treated anthracites [Text] / S. Pusz, B. K. Kwiecinska, S. Duber // Int. J. Coal Geol. - 2003. - 54. - №1-2. - P. 115-123. 8. Brandtzæg, S. R. Structural changes in graphite by heat treatment [Text] / S. R. Brandtzæg, H. Linga, H. A. Øye // Light Metals 1983. Proc. Techn. Sess. 112 AIME Ann. Meet. - Atlanta, GA, 6-10 March 1983, Warrandale, PA. - P. 711-725. 9. Уразлина, О. Ю. Исследование физических свойств термоантрацита при высокотемпературной прокатке антрацита [Текст] / О. Ю. Уразлина, М. М. Гасик, М. И. Гасик // Metallургическая и горнорудная промышленность. - 2004. - № 4. - С. 17-20. 10. Гасик, М. М. Математическое моделирование процесса электрокальцинации антрацита [Текст] / М. М. Гасик, М. И. Гасик, А. Г. Гриншпунт, Е. И. Цыбуля [и др.] // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Химия в строительных материалах и материаловедение в XXI веке» (Казахстан, г. Шымкент, Южно-Казахстанский государственный университет, 16-18 октября 2008 г.). - С. 36-49. 11. Гасик, М. М. Моделирование термического и электрического режимов работы электрокальцинатора при термической обработке антрацита [Текст] / М. М. Гасик, М. И. Гасик, О. Ю. Уразлина // Metallургическая и горнорудная промышленность. - 2004. - № 5. - С. 18-23.

Bibliography (transliterated): 1. Gasik, M. I. (1984). Elektrody rudovosstanovitelnyx pechej. - Moscow: Metallurgiya, 248. 2. Chalых, E. F. (1963). Tekhnologiya uglegrafitovyx materialov. - Moscow: Metallurgizdat, 304. 3. Celzard, A., Mareche, J. F. (2000). Electrical conductivity of anthracites as a function of heat treatment temperature. Carbon, 38, 1207-1215. 4. Ulanovskij, M. L., Zingerman, Yu. V., Menshikova, S. D. (1989). Elektrosoprotivlenie antracita v kuskax i ego svyaz s drugimi pokazatelyami. Khimiya tverdogo topliva, 6, 95-99. 5. Brandtzoeg, S. R. (1985) Structural changes during calcinations of coke and antracite. Doct. Thesis, Univ. Trondheim, Norway, 45. 200. 6. Marsh, N. (1979). Structural changes of anthracite. 14-th Bienn. Conf. On Carbon. Pens., USA. 165. 7. Pusz, S., Kwiecinska, B. K., Duber, S. (2003). Textural transformation of thermally treated anthracites. Int. J. Coal Geol, 54, 1-2. 115-123. 8. Brandtzæg, S. R., Linga, H., Øye, H. A. (1983). Structural changes in graphite by heat treatment. Light Metals 1983. Proc. Techn. Sess. 112 AIME Ann. Meet, 711-725. 9. Urazlina, O. Yu., Gasik, M. M., Gasik, M. I. (2004) Issledovanie fizicheskix svojstv termioantracita pri vysokotemperaturnoj prokalke antracita. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost, 4. 17-20. 10. Gasik, M. M., Gasik, M. I., Grinshpunt, A. G., Tsybulya, E. I. (2008). Matematicheskoe modelirovanie processa elektrokalcinacii antracita. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ximiya v stroitelnyx materialax i materialovedenie v XXI veke. 36-49. 11. Gasik, M. M., Gasik, M. I., Urazlina, O. Yu. (2004) Modelirovanie termicheskogo i elektricheskogo rezhimov raboty elektrokalcinatora pri termicheskoy obrabotke antracita. Metallur. i gornorud. promysh. №5. 18-23.

Надійшла (received) 18.12.2014

И. А. КАЗАК, канд. педаг. наук, ассистент, НТУУ «КПИ», Киев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ VBA ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММ

В статье предлагается способ автоматического создания программы с помощью макрорекордера в VBA на примере построения графика функции. Программы, написанные таким способом, можно многократно использовать с возможностью их дальнейшего редактирования, что позволит уменьшить трудоемкость работы по созданию программ с типичными действиями для студентов, инженеров, исследователей. Показано, что возможности VBA упрощают также написание и редактирование программ начинающим пользователям.

Ключевые слова: программа, макрорекордер, макрос, VBA, график, аргумент, функция, создание, проект, трудоемкость

Введение. На сегодняшний день, одной из актуальных проблем является трудоёмкость создания программ. Одним из способов решения данной проблемы является возможность автоматического создания программ с помощью макрорекордера в VBA.

VBA (Visual Basic for Applications) - это диалект языка программирования Visual Basic, который расширяет его возможности и предназначен для работы с приложениями Microsoft Office и другими приложениями от Microsoft и других компаний [1–4].

В большинство программ Microsoft Office встроено замечательное средство, которое позволит вам создавать программы, вообще ничего не зная о программировании. Это средство называется макрорекордер.

Цель работы. Целью работы является ознакомление с возможностями макрорекордера в VBA для автоматического создания программы (на примере построения графика заданной функции по «Информатике» для учебных и исследовательских процессов), которые могут применяться для любого рода типичных многократно повторяющихся действий (расчетов) студентами, инженерами, исследователями для получения, анализа, обработки различной информации и т.п.

Методика экспериментов автоматического создания программ в VBA. Макрорекордер, как понятно из его названия, - это средство для записи макросов. Макрос - всего лишь еще одно название для VBA - программы, а макрорекордер - средство для его автоматического создания [5–7].

Приложения Microsoft Office по умолчанию настроены так, что не позволяют запускать макросы. Поэтому перед тем, как приступить к созданию макросов, в меню Сервис | Макрос | Безопасность переставьте переключатель «Уровень безопасности» в положение «Средняя» или «Низкая», закройте и снова откройте программу. Это нужно сделать только один раз в начале работы.

Принцип работы макрорекордера больше похож на принцип работы магнитофона: мы нажимаем на кнопку - начинается запись тех действий, которые

мы выполняем. Мы нажимаем на вторую кнопку - запись останавливается, и мы можем его проиграть.

Чтобы создать макрос в макрорекордере, необходимо:

1. В меню Сервис | Макрос выберите «Начать запись». В окне «Запись макроса» вам потребуется определить:

- имя макроса (правило такое: имя не должно начинаться с цифры, не должно содержать пробелы и символы пунктуации);

- где сохранить макрос (текущая книга, создать макрос одновременно с созданием новой книги и личная книга макросов PERSONAL.XLS, макросы из которой будут доступны во всех книгах).

2. После нажатия кнопки ОК или назначения кнопки или клавиатурной комбинации начнется запись макроса. Появится маленькая панель ■ «Остановить запись» [8-10].

В дальнейшем у пользователя может возникнуть желание внести в макрос любые дополнения или исправления. Самый простой, но неудобный способ - воспользоваться окном меню Сервис | Макрос | Макросы | Изменить. Если вы пользуетесь макросом постоянно, то можно использовать самый быстрый способ его вызова - клавиатурную комбинацию.

Полные возможности программирования в Office раскрываются при использовании редактора Visual Basic. Для входа в него в меню Сервис | Макрос выбрать «Редактор Visual Basic», или нажать клавиши <Alt> + <F11>.

В верхнем левом углу обычно открыто окно проводника проекта. Если оно случайно было закрыто, то вызвать его можно, нажав клавиши <Ctrl> + <R>.

Самый верхний уровень - это проект (Project), которому соответствует документ Word, рабочая книга Excel и т. д. Проекты VBA выполняются вместе с другими приложениями. Приложение, в котором разрабатывается и выполняется проект VBA, называется основным. Например, можно создать проект VBA, который работает вместе с Microsoft Excel. В этом случае Excel является основным приложением. Фактически, используя основное приложение, нельзя построить приложение VBA [1].

VBA имеет собственную среду разработки, называется интегрированной средой разработки или IDE. VBA IDE - это окно, содержащее меню, другие окна и элементы, применяемые при создании проектов VBA [2]. Ниже меню VBA расположены программные модули. При работе макрорекордера в Excel – это Module1, куда и записываются все создаваемые макрорекордером макросы.

Вывести данные программы в VBA можно прямо в ячейку Excel.

После того, как нужная ячейка найдена, для записи в нее используется свойство Value, например: x.Value = значение.

Если ячейка уже выбрана, можно записать: ActiveCell.Value = значение.

Или сразу указать ячейку вывода: Cells (6, 1) = значение.

Выбрать ячейку, смещенную относительно текущей на i вниз и на j вправо:

ActiveCell.Offset (i, j) .Select

Range - очень важная функция. Возвращает объект Range, который представляет собой диапазон ячеек и используется в Excel практически для любых операций с ячейками.

Выбрать какую-либо ячейку, например, A6: Range ("A6"). Select.

Или диапазон ячеек: Range ("A1: A6"). Select

Прежде чем что-то выводить в таблицу, полезно очистить письмо, для чего служит команда Cells.Clear.

Formula (или FormulaR1C1) = "=" позволяет записать формулу в ячейку.

Пример:

Range ("A3"). Formula = "= 2 * \$ A \$ 1 ^ 2 + cos (\$ B \$ 1)" (абсолютные ссылки) или "= 2 * A1 ^ 2 + cos (B1)" (относительно ссылки).

ActiveCell.FormulaR1C1 = "= 2 * RC [-1] ^ 2 + cos (RC [-1])"

В формулу могут быть включены и переменные. Например, вместо 2 - используем переменную a. Тогда предварительную формулу следует переписать:

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=" & a & "* RC [-1] ^ 2 + cos (RC [-1])" [7].

Рассмотрим автоматическое создание программы макрорекордером в VBA на примере задания по «Информатике» для бакалавров машиностроительных и других специальностей - построение графика заданной функции, например: $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$. Научиться выполнять это задание при изучении курса «Информатика» очень актуально, так как построение графиков приходится выполнять очень часто и многократно студентам, будущим инженерам и ученым, необходимых при проведении научных исследований по техническим наукам.

Чтобы создать автоматически любую программу (макрос) макрорекордером в VBA, необходимо в меню Microsoft Office Excel 2010 выбрать Сервис | Макрос и нажать «Начать запись». В окне «Запись макроса» написать: имя макроса (не должно начинаться с цифры, содержать пробелы и символы пунктуации) и где сохранить макрос (текущая книга). После этого нажать кнопку ОК, чтобы началась запись макроса и в момент начала записи появится маленькая панель ■ - «Остановить запись», которой мы воспользуемся по завершении записи макроса [1].

Включив запись макроса, выполнить следующие действия в текущей книге Excel по построению графика заданной функции $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$:

- ввести в ячейки A1 и A2 первое и второе численные значения аргумента x;
- выделить ячейки A1 и A2 с численными значениями x и за правый нижний угол ячейки A2 растягиваем вниз на диапазон значений аргумента x, при котором хотим посчитать заданную функцию y;

- в ячейке B1 ввести формулу функции $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$, затем растянуть за правый нижний угол ячейки B1 вниз на диапазон заданных значений аргумента x и таким образом получаем в столбце B автоматически посчитанные численные значения функции y для заданного диапазона значений x;

- выделить столбцы A и B с заполненными ячейками, для этого нажать на левую кнопку мыши, не отпуская ее, протянуть сверху вниз до последних численных значений x и y. По выделенным значениям у строим график в Excel, для этого выбираем в меню Вставка | Диаграммы | Точечная диаграмма. Результат построения графика заданной функции представлен на рис. 1.

- останавливаем запись макроса макрорекордером по построению графика заданной функции, нажимая на ■ - «Остановить запись».

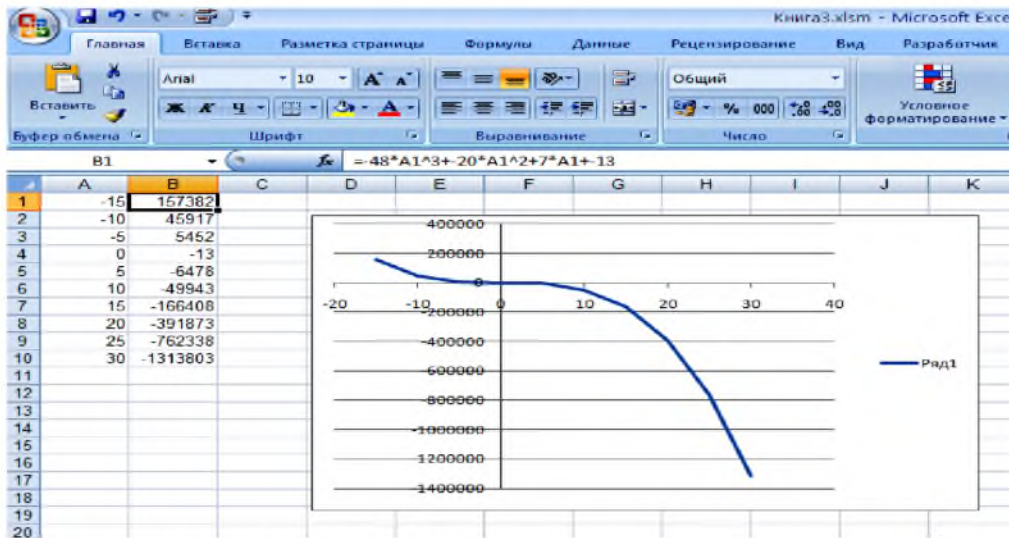


Рис. 1 - Численные значения аргумента x и функции $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$ на заданном диапазоне и построенный точечный график для автоматической записи программы

Обсуждение результатов записанного макроса макрорекордером по построению графика функции в VBA. Проверяем работу автоматически созданной программы в VBA по построению графика рассмотренной функции $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$:

- удаляем в текущей книге Excel все, что было нами записано в столбцах А и В для построения графика заданной функции и построенный точечный график, для этого выделяем всю область численных значений x и y и полученный график функции, нажимаем клавишу Delete;

- запускаем автоматически написанную программу (макрос) по построению графика функции, для этого в меню Microsoft Office Excel 2010 выбрать Сервис | Макрос и

выбрать «Выполнить». Автоматически записанная программа по построению графика функции представлена в окне VBA в подпрограмме Sub Mac () на рис. 2;

```

Sub Mac ()
    '
    ' Mac Макрос
    '

    Range("A1").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "-15"
    Range("A2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "-10"
    Range("A1:A2").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("A1:A10"), Type:=xlFillSeries
    Range("A1:A10").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "--48*RC[-1]^3-20*RC[-1]^2+7*RC[-1]-13"
    Range("B1").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("B1:B10"), Type:=xlFillValues
    Range("B1:B10").Select
    ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select
    ActiveChart.SetSourceData Source:=Range("'Лист1'!$B$1:$B$10")
    ActiveChart.ChartType = xlXYScatterLines
End Sub
  
```

Рис. 2 - Автоматически написанная программа макрорекордером по построению графика функции $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$

- в текущей книге Excel видим записанные значения x и y в столбцах А и В и построенный по ним точечный график заданной функции $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$, которые выполнила автоматически созданная макрорекордером программа (макрос) после его написания для построения графика этой функции (рис. 3).

При желании можно внести в автоматически написанную программу (макрос) любые дополнения или исправления. Самый простой способ - воспользоваться окном меню Сервис | Макрос | Макросы | Изменить.

Теперь с помощью автоматически полученной программы для построения графика

функции, изменив, например, коэффициенты при аргументе x (или полностью написав новую функцию), можно запустить на выполнение эту программу, и она сама построит график функции с измененными коэффициентами (или функцией). При этом не нужно заново выполнять все действия по построению графика измененной функции, а эти действия многократно будет выполнять автоматически написанная программа по построению графика с внесенными изменениями в программу.

Например, в ранее автоматически написанной программе Sub Mac() макрорекордером по построению графика заданной функции $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$ поменяем коэффициенты в уравнении функции при аргументе x в полиноме третьей степени на 48, в полиноме второй степени - на 20 и получим уже другую функцию $y(x) = 48 \cdot x^3 + 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$ (рис. 4).

Уделите несколько минут внимательному изучению программы, которую сгенерировал Excel. Если вы новичок, вклад нескольких минут в изучение автоматически написанной программы макрорекордером дадут потрясающий результат в знакомстве с объектами VBA в дальнейшем.

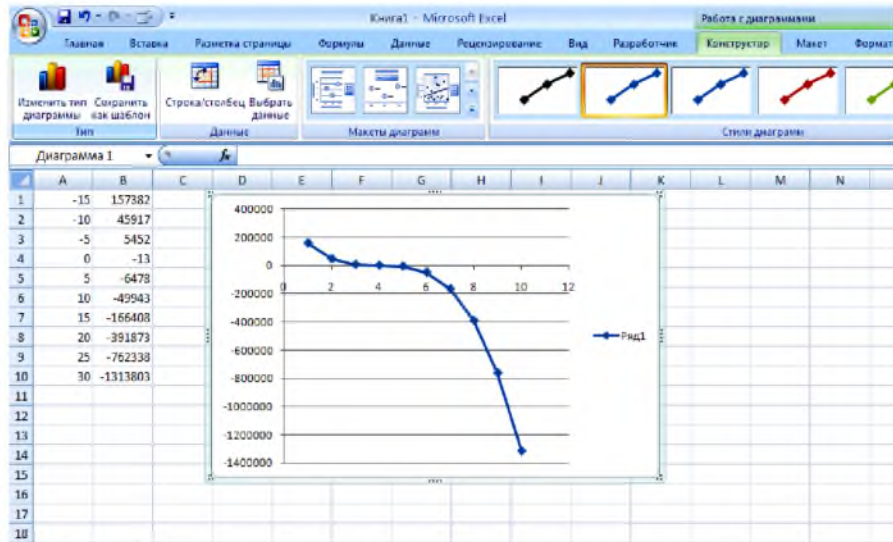


Рис. 3 - Численные значения аргумента x и функции $y(x) = -48 \cdot x^3 - 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$ на заданном диапазоне и построенный точечный график, выполненные макросом

```

Sub Mac ()
    ' Макрорекодер
    Range ("A1").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "-15"
    Range ("A2").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "-10"
    Range ("A1:A2").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range ("A1:A10"), Type:=xlFillSeries
    Range ("A1:A10").Select
    Range ("B1").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=48*RC[-1]^3+20*RC[-1]^2+7*RC[-1]-13"
    Range ("B1").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range ("B1:B10"), Type:=xlFillValues
    Range ("B1:B10").Select
    ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select
    ActiveChart.SetSourceData Source:=Range ("'Лист1'!$B$1:$B$10")
    ActiveChart.ChartType = xlXYScatterLines
End Sub
    
```

Рис. 4 - Измененная автоматически написанная программа макрорекордером по построению графика функции $y(x) = 48 \cdot x^3 + 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$

Далее в книге 1 удалим всю предыдущую информацию выделением этой информации и нажатием клавиши Delete. Потом воспользуемся окном меню Excel в открытой книге 1 - Сервис | Макрос | Макросы | Выполнить и выбираем макрос Мас, который уже содержит изменения в программе в коэффициентах функции, в книге 1 автоматически построится новый график функции с измененными коэффициентами:

$$y(x) = 48 \cdot x^3 + 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$$

(рис. 5).

Обратите внимание,

что рассмотренный нами пример всего лишь иллюстрация. Следовательно, овладев VBA для Excel, вы сможете сразу перейти к созданию макросов для других программных продуктов Microsoft. Более того, вы сможете создавать полноценные программные продукты, одновременно использующие функции самых разных приложений [5].

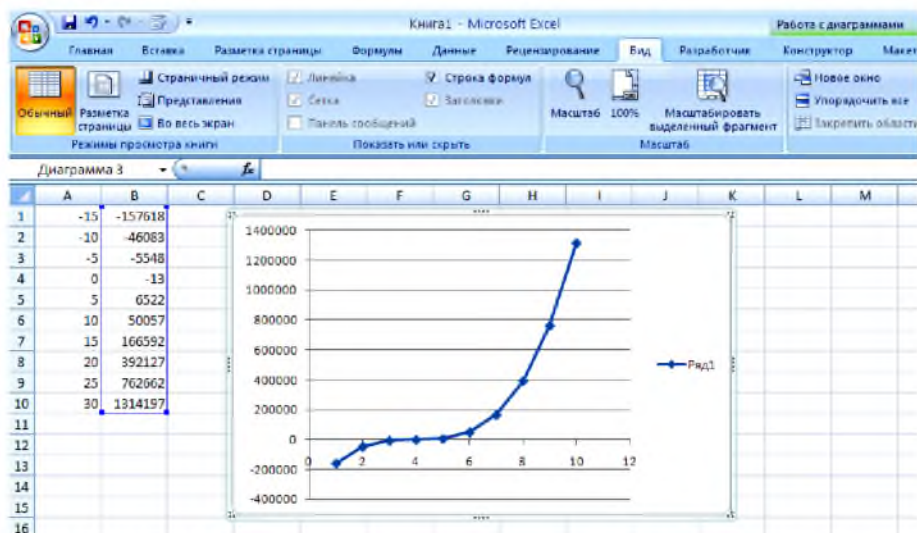


Рис. 5 - Численные значения аргумента x и функции $y(x) = 48 \cdot x^3 + 20 \cdot x^2 + 7 \cdot x - 13$ на заданном диапазоне и построенный точечный график, выполненный измененным макросом

Выводы. Таким образом, использование автоматически созданных маркорекордером программ в VBA позволит уменьшить затраты времени студентов, ученых, инженеров на выполнение многократных, типично повторяющихся действий, например, построение графиков различных функций для последующего их анализа, обобщения информации и т.п. А также, возможности VBA упрощают написание и редактирование программ начинающим пользователям.

Список литературы: 1. Гарнаев, А. Ю. Excel, VBA, Internet в экономике и финансах / А. Ю. Гарнаев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 816 с. 2. Згуровський, М. З. Вступ до комп'ютерних інформаційних технологій: навч. посіб. / М. З. Згуровський, І. І. Коваленко, В. М. Михайленко. – К.: Вид-во Європ. ун-ту (фінанси, інформ. системи, менеджм. і бізнес), 2000. – 265 с. 3. Геворкян, Г. Х. Бейсик – это просто / Г. Х. Геворкян, В. Н. Семенов. – М.: Радио и связь, 1989. – 144 с. 4. Якушева, Н. М. Visual Basic для студентов / Н. М. Якушева. – М.: Радио и связь, 2001. – 232 с. 5. Слетцова, Л. Д. Программирование на VBA. Самоучитель / Л. Д. Слетцова. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 384 с. 6. Назаров, С. В. Программирование в пакетах MS Office: навч. посіб. / С. В. Назаров, П. П. Мельников, Л. П. Смольников и др. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 656 с. 7. Хорев, В. Д. Самоучитель программирования на VBA в Microsoft Office / В. Д. Хорев. – К.: Юниор, 2001. – 320 с. 8. Кузьменко В. Г. Программирование на VBA 2002 / В. Г. Кузьменко. – М.: ООО "Бином-Пресс", 2003 г. – 880 с. 9. Камминг, Стив. VBA для "чайников" / Стив Камминг; пер. с англ. – [3-е изд.]. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001 – 448 с. 10. Глушаков, С. В. Microsoft Excel 2007. Краткий курс / С. В. Глушаков, А. С. Сурядный. – М.: Харвест, 2008. – 352 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Garnaev, A. Y.* (2001). Excel, VBA, Internet in economics and finance, 816. 2. *Zgurovsky, M. Z.* (2000). Introduction to computer information technology: Navch.posib. / M. Z. Zgurovsky, I. I. Kovalenko, V.M. Mihaylenko, 265. 3. *Gevorkian, G. H.* (1989). Basic is easy, 144. 4. *Yakushev, N. M.* (2001). Visual Basic for students, 232. 5. *Sleptsova, L. D.* (2004). VBA Programming. The tutorial, 384. 6. *Nazarov, C. V.* (2007). Programming in MS Office packages: Navch.posib. / C. V. Nazarov, P. P. Mel'nikov, L. P. Smolnikov, etc., 656. 7. *Horev, C. D.* (2001). Manual of VBA programming in Microsoft Office, 320. 8. *Kuzmenko, C.* (2003) VBA Programming 2002, 880. 9. *Cumming, Steve.* (2001). VBA for dummies.: TRANS. from English, 448. 10. *Ghushakov, S. C.* (2008). Microsoft Excel 2007. Short course, 352.

Надійшла (received) 10.12.2014

УДК 621.182.2.001.57

Є. Є. ЧАЙКОВСЬКА, канд. техн. наук, с. н. с., доц., ОНПУ, Одеса;
Б. І. МОЛОДКОВЕЦЬ, магістр, ОНПУ, Одеса;

ПІДТРИМКА ФУНКЦІОНУВАННЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ У СКЛАДІ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Розроблено метод підтримки процесу зброджування, відвантаження зброженої сировини та завантаження свіжого матеріалу на рівні прийняття рішень. Прогнозування зміни температури зброджування дозволяє використовувати зброжене сушло в якості низькопотенційного джерела енергії для теплового насоса щодо встановлення температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк, при вимірюванні температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника.

Ключові слова: когенерація, електрична енергія, теплота, біогаз, зброджування, метантенк, тепловий насос, прийняття рішень

Вступ. Однією з переваг когенераційних технологій в умовах ресурса та енергозбереження є можливість використання біогазу як альтернативного джерела енергії [1]. Когенераційні технології, що мають у своєму складі первинний двигун, електрогенератор, систему утилізації теплоти, систему контролю й управління дозволяють включати в технологічні схеми різні енергетичні установки: поршневий двигун, газову турбін, парову турбін або комбінацію парової та газової турбін. Теплові насоси, що використовують у складі когенераційних систем, не мають зв'язку з виробництвом біогазу, не використовують зброжений матеріал у якості низькопотенційного джерела енергії, а виконують підтримку співвідношення виробництва електричної енергії та теплоти з використанням інших джерел енергії [2 – 4]. При виробництві ж біогазу зброжене сушло має енергетичний потенціал щодо можливості використання у якості низькопотенційного джерела енергії для теплового насоса, а на підтримку процесу зброджування витрачають до 20% – 30% виробленої енергії.

Умови когенерації при використанні біогазу ускладнені непостійним виходом біогазу, що вимагає додаткових баків для зброженої сировини, додаткових ємностей газгольдерів, значних витрат теплоти на підтримку процесу зброджування за рахунок виробленої енергії [5 – 7]. При безперервному

© С. С. ЧАЙКОВСЬКА, Б. І. МОЛОДКОВЕЦЬ, 2014

функціонуванні біогазової установки відвантаження збродженого сусла та завантаження свіжого матеріалу відбувається через 4-6 годин на добу. У зв'язку із залежністю температури свіжого сусла, що завантажують, від температури навколишнього середовища складно визначити точний термін виконання цього важливого елементу технологічного процесу виробництва біогазу. Більш того, підтримку процесу зброджування виконують з вимірюванням температури зброджування щодо зміни витрати свіжого сусла. Використання ж цієї оцінки ускладнено через значну теплову акумулюючу ємність сусла. Зміна витрати сусла може порушити необхідний баланс потоків свіжого і збродженого матеріалу для отримання постійного виходу біогазу, а використання зміни витрати теплоносія, що гріє може порушити активність процесу зброджування.

Мета роботи. Метою роботи є підтримка процесу зброджування, своєчасне відвантаження збродженої сировини та завантаження свіжого сусла для забезпечення постійного виходу біогазу в умовах когенераційної системи.

Архітектура когенераційної системи. На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем [8, 9] запропонована архітектура когенераційної системи, основою якої є інтегрована динамічна підсистема –

когенераційна установка, біогазова установка, тепловий насос, що використовує зброджене сусло у якості низькопотенційного джерела енергії та блоки розряду, заряду, оцінки функціональної ефективності (рис. 1).

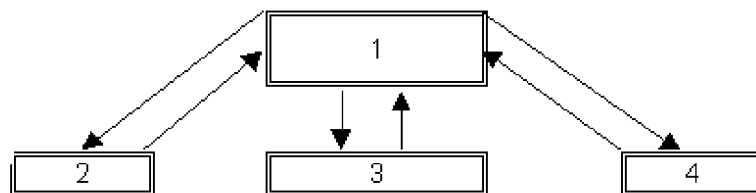


Рис. 1 – Архітектура когенераційної системи: 1 - динамічна підсистема (когенераційна установка, біогазова установка, тепловий насос); 2 - блок розряду; 3-блок заряду; 4 - блок оцінки функціональної ефективності

Математичне обґрунтування архітектури когенераційної системи:

$$CS = ((D(P(\tau)(x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau))), R(\tau), P(\tau))), R(\tau), (P_i(\tau)(x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau))))).$$

де CS - когенераційна система; D - динамічна підсистема; P - властивості елементів когенераційної системи; x - впливи; f - параметри, що діагностуються; K - коефіцієнти математичного опису; y - вихідні параметри; d - динамічні параметри; R - логічні відносини в CS ; τ - час, с. Індекси: i - число елементів когенераційної системи; 0, 1, 2 - початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Прийняття рішень на підтримку функціонування біогазової установки. Запропоновано вимірювати температуру теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника, вбудованого в метантенк, яка змінюється за часом раніше, ніж змінюється температура зброджування через значну акумулюючу ємність сусла. Зміну ж температури зброджування запропоновано оцінювати аналітично. Так, основою для здобуття діагностичної інформації як еталонної, так і функціональної є математична модель динаміки зміни температури зброджування. Згідно

методології математичного опису динаміки енергетичних систем як основи діагностики система диференціальних рівнянь включає рівняння стану як оцінку фізичної моделі біогазової установки, рівняння енергії передавального й сприймаючого середовищ, рівняння теплового балансу для стінки теплообмінника. Рівняння енергії сприймаючого середовища розроблено щодо істотного параметра, що діагностується – температури зброджування із представленням її зміни не тільки в часі, але й уздовж просторової координати осі теплообмінника вбудованого в метантенк, що співпадає з напрямком потоку руху середовища [8 – 9]. В результаті реалізації системи нелінійних диференціальних рівнянь отримана передатна функція за каналом: «температура зброджування – температура теплоносія, що гріє»:

$$W_{t-\theta_1} = \frac{K_3 \varepsilon (1 - L_3^*)}{L_b \beta \gamma} (1 - e^{-\gamma \xi}),$$

$$\begin{aligned} \text{де } K_3 &= \frac{m(\theta_0 - \alpha_0)}{G_{30}}; & \varepsilon &= \frac{\alpha_{30} h_{30}}{\alpha_{b0} h_{b0}}; & L_3^* &= \frac{1}{L_3 + 1}; & L_3 &= \frac{G_3 C_3}{\alpha_{30} h_{30}}; & L_b &= \frac{G_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}}; & \beta &= T_M S + \varepsilon^* + 1; \\ T_M &= \frac{g_m C_m}{\alpha_{b0} h_{b0}}; & \varepsilon^* &= \varepsilon (1 - L_3^*); & \gamma &= \frac{(T_b S + 1) \beta - 1}{L_b \beta}; & T_b &= \frac{g_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}}; & L_b &= \frac{G_b C_b}{\alpha_{b0} h_{b0}}; \\ \chi &= \frac{(T_b S + 1) \beta - 1}{\beta}; & \xi &= \frac{z}{L_b}, \end{aligned}$$

де t, σ, θ - температура зброджування, теплоносія, що гріє, стінки теплообмінника, K , відповідно; G – витрата речовини, кг/с; C – питома теплоємність, кДж/(кг·К); α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²·К); h – питома поверхня, м²/м; g – питома маса речовини, кг/м; z – координата довжини теплообмінника, м; T_b, T_M – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу здатність суслу, метала, с, відповідно; m – показник залежності коефіцієнта тепловіддачі від витрати; S – параметр перетворення Лапласа. Індекси: b – внутрішній потік - сусло, m – металева стінка, z – зовнішній потік - теплоносій, що гріє; $0, 1$ - початкові умови, вхід в теплообмінник, відповідно.

Розроблено комплексне моделювання динаміки біогазової установки та теплообмінника, вбудованого в метантенк, для визначення його конструктивних і режимних параметрів та встановлення рівнів зміни температури теплоносія, що гріє, на вході та на виході з теплообмінника. Використання комплексного моделювання та вимірювання реальної зміни температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника дозволяє здобути еталонні зміни температури зброджування та системи контролю працездатності та ідентифікації стану біогазової установки щодо підтримки процесу зброджування та виконання своєчасного відвантаження зброженого матеріалу і завантаження свіжого суслу з використанням теплового насоса [8–10]. Так, для підтримки температури зброджування на рівні 34°C–36°C встановлені наступні рівні функціонування біогазової установки щодо зміни температури теплоносія, що гріє на вході та на виході з теплообмінника, відповідно: перший рівень: 55°C–44,15°C; другий рівень: 52,1°C–43,06°C; третій рівень: 49,9°C–42,3°C; четвертий рівень: 47,5°C–41,35°C; п'ятий рівень: 45°C–40,3°C (рис. 2).

На основі контролю працездатності та підтримання стану інтегрованої динамічної підсистеми когенераційної системи з використанням метода графа причинно-наслідкових зв'язків [8, 9] можливо отримати таку підсумкову інформацію щодо оцінки зміни температури зброджування:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) < < \Delta t_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau)) > 0)$$

чи таку:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) > > \Delta t_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau)) < 1),$$

що надає можливість приймати рішення на розряд чи заряд біогазової установки, відповідно, на основі теплового насоса, що використовує у якості низькопотенційного джерела енергії відвантажене сусло:

$$(P(\tau)(\sigma_{\text{вх}}(\tau)(-)(+)), Z_{\text{сс}}(\tau).$$

Так, наприклад, при функціонуванні біогазової установки в першому рівні зменшення температури теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника при розряді до $43,6^{\circ}\text{C}$, потребує прийняття рішення на зміну температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник до рівня $52,1^{\circ}\text{C}$ щодо переходу на другий рівень функціонування біогазової установки для підтримки температури зброджування в межах 34°C – 36°C (рис. 3). Здобута ж підсумкова інформація щодо оцінки зміни температури зброджування:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) \leq 0))$$

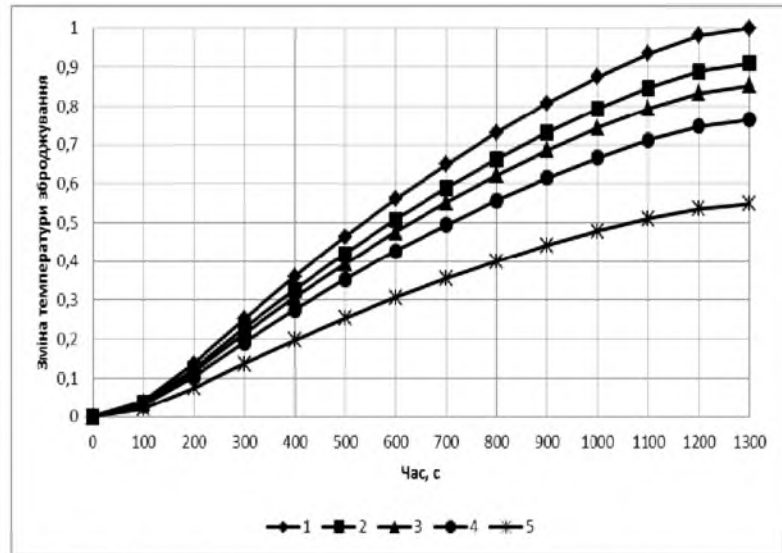


Рис. 2 – Еталонні динамічні характеристики температури зброджування для встановлених рівнів функціонування біогазової установки; 1, 2, 3, 4, 5 - еталони першого, другого, третього, четвертого, п'ятого рівнів функціонування, відповідно

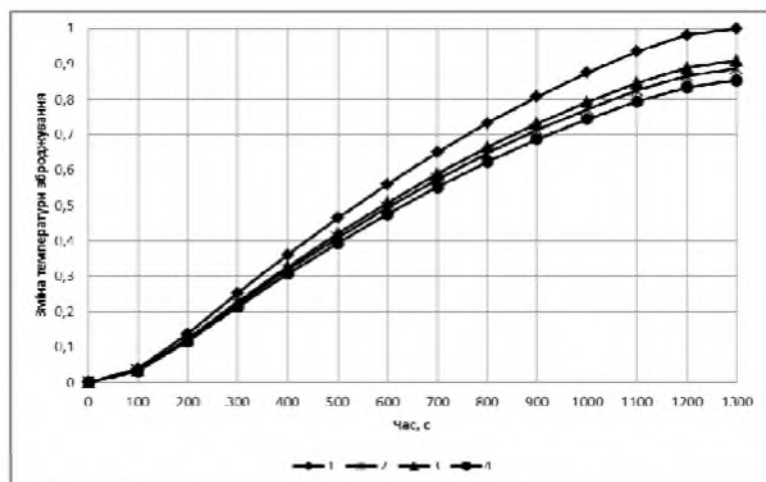


Рис. 3 – Зміна температури зброджування щодо переходу з першого рівня функціонування на другий рівень; 1 – еталон першого рівня; I, 2 – прийняття рішення та підтвердження нових умов функціонування, 3 – еталон другого рівня; 4 – еталон третього рівня

при функціонуванні біогазової установки в межах п'ятого рівня свідчить про неможливість підтримки температури зброджування від 34°C до 36°C, бо температура теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника зменшилась до 37,04°C. Такі умови потребують прийняття рішення на відвантаження збродженого суслу (рис. 4).

Завершення процесу завантаження свіжого матеріалу відбувається при входженні температури зброджування в допуск першого рівня функціонування біогазової установки щодо здобуття наступної інформації:

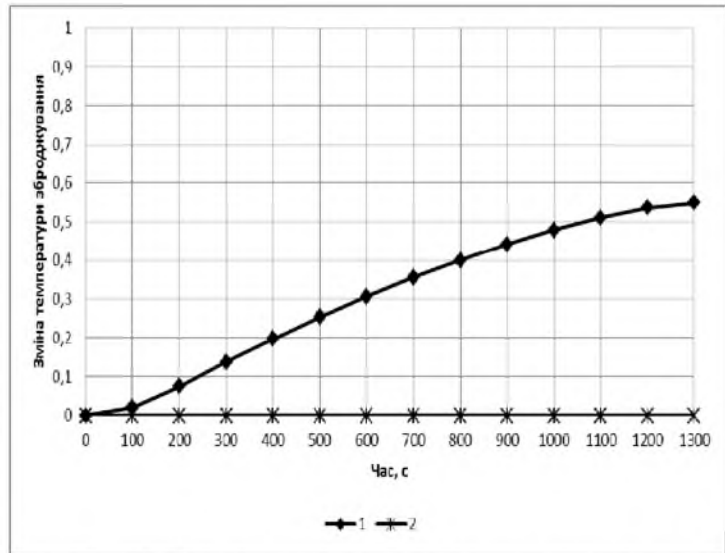


Рис. 4 – Зміна температури зброджування щодо відвантаження збродженого суслу; 1 – еталон п'ятого рівня функціонування; 2 – прийняття рішення на відвантаження та підтвердження нових умов функціонування

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) \leq 1)),$$

тобто при підвищенні температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник до 55°C (рис. 5).

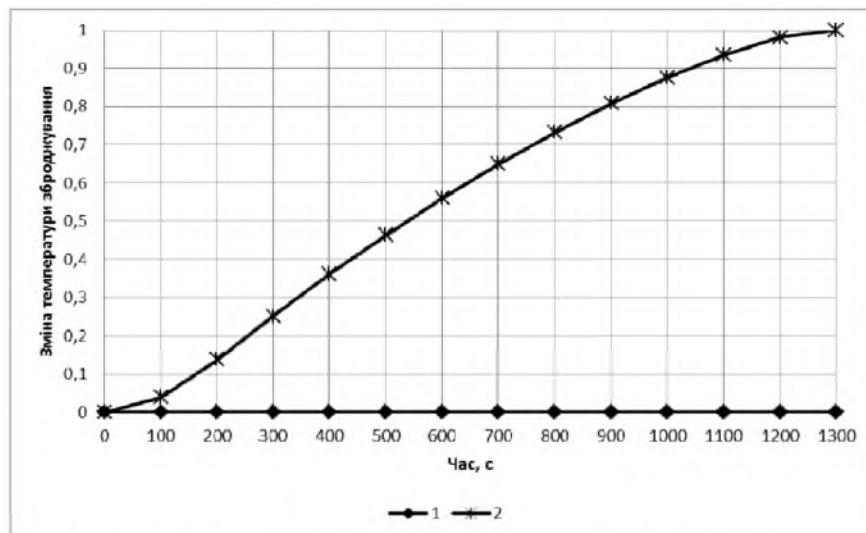


Рис. 5 – Зміна температури зброджування щодо завантаження свіжого матеріалу; 1 – прийняття рішення на завантаження свіжого матеріалу та ідентифікація нових умов функціонування; 2 – еталон першого рівня функціонування де CT – контроль події; P – властивості інтегрованої динамічної підсистеми; t , σ – температура зброджування, теплоносія, що гріє, °C, відповідно; τ – час, с. Індекси: c – контроль працездатності; гр. вх. – теплоносій, що гріє на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк; розр. рів. - розрахункове значення температури зброджування рівня функціонування; ст., розр., верх. – стале, розрахункове значення температури зброджування першого рівня функціонування

Висновки. Розроблений метод підтримки функціонування біогазової установки на рівні прийняття рішень дозволяє, наприклад, при виробництві 352,5 м³/добу біогазу здобути економію біогазу 25,4 тис.м³/рік, що при підвищенні товарності біогазової установки на 13,94 % надає можливість в умовах когенераційної системи знизити собівартість виробництва електроенергії та теплоти в межах 20% –30 %.

Список літератури: 1. Железная, Т. А. Перспективы производства электрической энергии из биомассы в Украине [Текст] / Т. А. Железная, Е. Н. Олейник, А. И. Гелетуха // Промышленая теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 67–75. 2. Билека, Б. Д. Когенерационно - теплонасосные технологии в схемах горячего водоснабжения большой мощности [Текст] / Б. Д. Билека, Л. К. Гаркуша // Промышленная теплотехника. 2012. – Т. 34, № 4. – С. 52–57. 3. Билека, Б. Д. Экономичность когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями [Текст] / Б. Д. Билека, Р. В. Сергиенко, В. Я. Кабков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 7 (74). – С. 25–29. 4. Горобець, В. Г. Ексергетичний аналіз ефективності енергетичних систем для комплексного виробництва електричної та теплової енергії з використанням поновлювальних джерел енергії [Текст] / В. Г. Горобець, Б. Х. Драганов // Відновлювальна енергетика. – 2010. – № 3 (22). – С. 5–12. 5. Ратушняк, Г. С. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 2. – С. 26–31. 6. Ратушняк, Г. С. Автоматичне управління в системах біоконверсії [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 116–121. 7. Ратушняк, Г. С. Моделювання нестационарних режимів теплообміну в біогазових реакторах [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 2. – С. 142–145. 8. Чайковская, Е. Е. Оптимизация энергетических систем на уровне принятия решений [Текст] / Е. Е. Чайковская // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 7. – С. 169–173. 9. Чайковська, Є. Є. Технологічна система виробництва та споживання біогазу [Текст] / Є. Є. Чайковська // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/8 (70). – С. 50–57. 10. Молодковець, Б. І. Енергозберігаюча технологія виробництва біогазу на основі теплового насоса [Текст] Б. І. Молодковець // Матеріали Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузі “Електротехніка та електромеханіка”. Збірник рефератів робіт. - Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2014. – С. 16-18.

Bibliography (transliterated): 1. Geleznaia, T. A., Oleinic, E. N., Geletuha, A. I. (2013). Prospects for the production of electricity from biomass in Ukraine. *Industrial Heat*, 35 (6), 67–75. 2. Biliaka, V. D., Harkucha, L. K. (2012). Cogeneration, heat pump technology in hot water circuits of high power. *Industrial Heat*, 34(4), 52–57. 3. Biliaka, B. D., Sergienko, R. V., Kabkov, V. Y. (2010). Efficiency cogeneration and combined-heat pump systems with gas piston and turbine engine. *Aerospace equipment and technology*, 7(74), 25–29. 4. Horobets, V. G., Drahanov, B. H. (2010). Exergy efficiency analysis of power systems for integrated production of electricity and heat using renewable energy. *Renewable Energy*, 3 (22), 5–12. 5. Ratushniak, G. S., Dgedgula, V. V. (2006). Intensification of heat transfer and thermal stabilization of bioreactors. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2, 26–31. 6. Ratushniak, G. S., Dgedgula, V. V. (2006). Automatic control systems bioconversion. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnical Institute*, 6, 116–121. 7. Ratushniak, G. S., Dgedgula, V. V., Anohina, K. V. (2010). Simulation of unsteady heat transfer modes in biogas reactors. *Bulletin of the Khmelnytsky National University*, 2, 142–145. 8. Chaikovskaya, E. E. (2013). Optimization of energy systems at the level of decision-making. *Industrial Heat*, 35 (7), 169–173. 9. Chaikovskaya, E. E. (2014). Technological system of production and consumption of biogas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/8 (70), 50–57. 10. Molodkovets B. I. (2014). Energy-saving technology for biogas production based on heat pump. *Proceedings of the All-Ukrainian competition of student research papers in the field of “Electrical and Electromechanics”*. Digest of abstracts of works. Dneprodzherzhinsk, DCTU, 6-18.

Надійшла (received) 15.12.2014

Я. С. БЕДЕРАК, інженер, Публічне акціонерне товариство «АЗОТ», Черкаси

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ СКЛАДНОСТРУКТУРОВАНИХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Проведено дослідження режиму роботи електропостачальної системи промислового підприємства з здвоєним струмообмежувальним реактором 10 (6) кВ, до однієї вітки якого підключена конденсаторна установка, а до другої – асинхронні електродвигуни, при наявності в системі джерела вищих гармонік. Запропоновані заходи з забезпечення електромагнітної сумісності в таких мережах у різноманітних випадках підключення джерела вищих гармонік до мережі.

Ключові слова: конденсаторна установка, здвоєний струмообмежувальний реактор, вищі гармоніки, резонанс, електромагнітна сумісність.

Вступ. На промислових підприємствах (ПП) середньої та великої потужності, збудованих в 60-70 роки минулого сторіччя в країнах колишнього СРСР, розповсюджені схеми електропостачання, за якими електроприймачі живились через силові понижуючі трансформатори 220 (110) /10 (6) кВ з розщепленими обмотками та здвоєні реактори на напругу 10 (6) кВ (рис. 1). Такі схеми електропостачання є достатньо надійними. Вони призначені для зниження струму трьохфазного замикання в електропостачальній системі (ЕПС) ПП до значень 20–30 кА (що дозволяє використовувати вимикачі на номінальний струм 630–1250 А).

На рис. 1 наведена тільки верхня частина ЕПС ПП. А уся ЕПС є сукупністю більш ніж 10 підстанцій напругою 10(6) кВ, 50 приєднань понижуючих силових трансформаторів та електродвигунів напругою понад 1 кВ, декількох десятків кілометрів кабельних або повітряних ліній 10 (6) кВ. Такі ЕПС називаються складно-структурованими (на російській мові «структурно складними»).

Одним з недоліків таких ЕПС є погана електромагнітна сумісність таких мереж у випадку, коли до однієї вітки здвоєного струмообмежувального реактора підключена конденсаторна установка (КУ), а до другої вітки – промислове навантаження активно-індуктивного характеру, при наявності в мережі джерела вищих гармонік (ДВГ). Тоді в такому контурі при сталому навантаженні або в режимі пуску нелінійного навантаження може виникнути резонанс струмів.

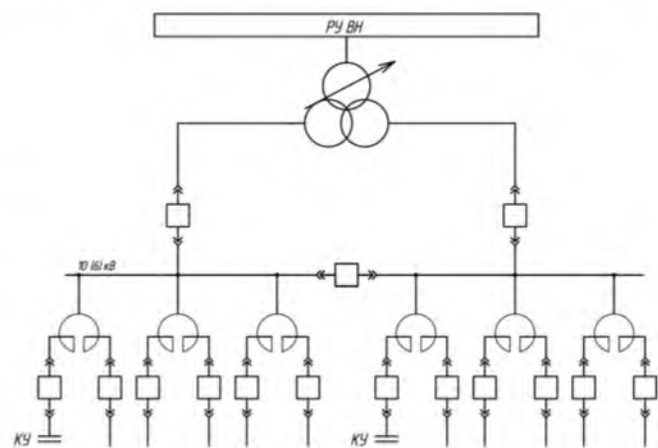


Рис. 1 – Приклад ЕПС з силовим трансформатором з розщепленими обмотками та з здвоєними реакторами

Забезпечення ЕМС в режимі пуску нелінійного навантаження в складноструктурованих ЕПС розглянуто в публікації [1]. Питання забезпечення ЕМС в таких мережах в сталих режимах досліджували Курінний Е. Г. [2], Жежеленко І. В. [3], але питання розрахунку резонансної частоти в контурі, де до однієї вітки зведеного струмообмежувального реактора підключена конденсаторна установка (КУ), а до другої вітки – промислове навантаження активно-індуктивного характеру, у складі якого або зовні розташовано ДВГ, ще не розглядалося. Точний розрахунок резонансної частоти для кожної гармоніки дозволить уникнути співпадіння її з частотою непарних гармонік, кратних 50 Гц, захистити мережу ПП від резонансу струмів. Це забезпечить електромагнітну сумісність в ЕПС ПП.

Мета роботи. Метою даної роботи є забезпечити ЕМС в складноструктурованих ЕПС, коли до однієї вітки зведеного струмообмежувального реактора підключена конденсаторна установка (КУ), а до другої вітки – промислове навантаження активно-індуктивного характеру при наявності в ЕПС ДВГ.

Вихідні дані для проведення розрахунків резонансної частоти. На прикладі конкретної ЕПС ПП при наявності джерела розраховується резонансна частота в контурі, що складається з двох паралельних віток. До однієї вітки зведеного струмообмежувального реактора підключена конденсаторна установка (КУ), а до другої вітки – промислове навантаження активно-індуктивного характеру, у складі якого є ДВГ.

Від мережі 110 кВ живиться головна понижувальна підстанція (ГПП), на якій знаходиться трансформатор ТДН – 10000/110 (паспортні дані: напруга обмотки високої напруги $U_{ВН} = 115$ кВ, напруга обмотки низької напруги $U_{НН} = 6,3$ кВ; напруга короткого замикання $u_k = 10,5$ %; втрати короткого замикання $\Delta P_k = 60$ кВт). В максимальному режимі роботи електросистеми $U_{\max} = 123,3$ кВ. Струм трьохфазного короткого замикання $I_k^{(3)} = 8,033$ кА.

До трансформатора підключений зведений струмообмежувальний реактор РБАС – 2 x 1000 - 6, що має такі параметри: опір однієї вітки зведеного реактора $X_p = 0,21$ Ом; коефіцієнт зв'язку $K_{зв} = 0,44$; втрати на одну фазу реактора при номінальному струмі (1000 А) $\Delta P_{ном} = 11,1$ кВт.

До однієї вітки зведеного реактора підключається конденсаторна установка (КУ) потужністю $Q = 1980$ кВАр (3 секції трьохфазних силових конденсаторів потужністю 660 кВАр кожна). Втрати потужності в КУ складають $\Delta P = 0,07$ Вт/кВАр. Середня лінійна напруга системи шин $U_{ном} = 6300$ В, номінальна напруга КУ $U_{ном КУ} = 6600$ В. Реактивна потужність фази однієї секції КУ: $Q_{Y\phi} = 660/3 = 220$ кВ·Ар.

Від секції підстанції живляться 3 двигуна типу АОД – 1250 – 4У1, Каталожні параметри двигуна [4]: $n_1 = 1440$ об/хв; $n_{ном} = 1500$ об/хвилину; $s_{ном} = 0,04$; КПД $\eta = 95,9$ %; $\cos \phi_{ном} = 0,88$; номінальний струм $I_{ном} = 143$ А, номінальна потужність $P = 1250$ кВт. Кратність максимального моменту $\frac{M_{\max}}{M_{ном}} = 2,5$; кратність пускового

моменту $\frac{M_{пуск}}{M_{ном}} = 1,1$; кратність пускового струму $K_{п} = 7$. Кожний електродвигун

підключений до секції шин через кабель марки АСБГ 3 х 120 довжиною 80 м. Номінальне сковзання

$$s_{\text{ном}} = (1500 - 1440) / 1500 = 0,04.$$

Від реактора до підстанції 6 кВ прокладена кабельна траса, що складається з двох кабелів марки АСБГ 3 х 120 довжиною 600 м. Однолінійна схема такої мережі наведена на рис. 2.

В публікації [5] розрахована резонансна частота без урахування зміни опору елементів мережі на підвищених частотах). В цій публікації опори елементів ЕПС визначаються на підвищених частотах згідно [6] (табл. 1).

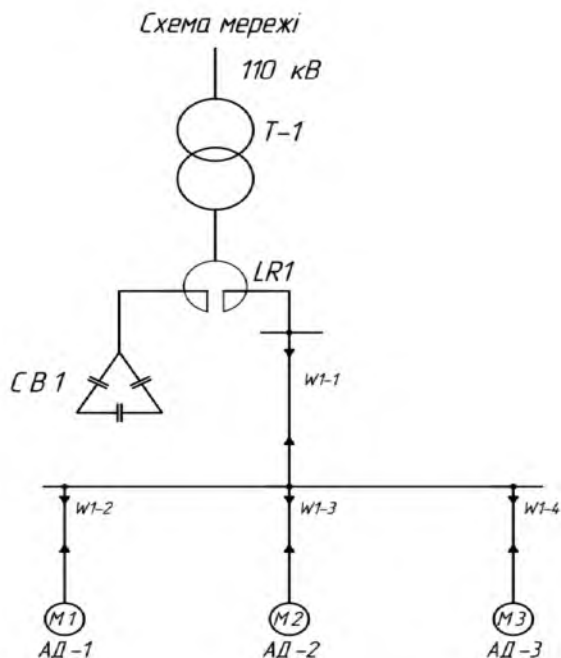


Рис. 2 – ЕПС з силовим трансформатором ГПП

Таблиця 1 – Формули для розрахунку опорів елементів ЕПС на підвищених частотах

Елемент	Опір оберненої послідовності активний R_2 ; індуктивний X_2 та повний Z_2 , Ом	Опори струму вищої гармоніки активні R_v та X_v , Ом	Прийняті позначення
1	2	3	4
КУ	$X_2 = -\frac{U_0^2 \cdot 10^3}{Q_0}$	$X_v = X_2 / v$ v – порядковий номер гармоніки	Q_0 – підімкнена потужність КУ, кВАр
Кабельна лінія	$X_2 = r_0 l_i$ $R_2 = r_0 l_i$	$X_v = \frac{X_2}{v}$ $R_v = R_2 \sqrt{v}$ [7]	$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга лінії, кВ; x_0 – індуктивний опір 1 км кабеля; r_0 – активний опір 1 км кабеля; l_i – довжина i -ї лінії, км
Електрична система	$X_{c2} = 0,65 X_{k*} = 0,65 \frac{U_{\text{max}}}{I_{\text{max}}^{(3)} \sqrt{3}}$	$X_{cv} = X_{c2} v$	X_{k*} – опір КЗ на шинах підстанції електричної системи, Ом; U_{max} – напруга на шинах підстанції в максимальному режимі енергосистеми, кВ; $I_{\text{max}}^{(3)}$ – значення струму трьохфазного короткого замикання в максимальному режимі на шинах підстанції, кА

1	2	3	4
Здвоєний реактор	$X_2 = \frac{X_p U_{\delta}^2}{100 I_{ном} \sqrt{3} U_{ном}};$ $R_2 = \frac{\Delta P_{ном}}{I_{ном}^2}.$	$X_{v,1} = -k_{зв} X_2 v$ $X_{v,2} = X_2 v \cdot (1+k_{зв})$ <p>Формули визначення $X_{v,1}$ та $X_{v,2}$ їх наведені в [7].</p>	X_p - реактивний опір однієї гілки реактора, %; $I_{ном}$ - номінальний струм однієї гілки реактора, кА; $k_{зв}$ - коефіцієнт зв'язку; $\Delta P_{ном}$ - номінальні втрати в одній фазі реактора, кВт; $I_{ном}$ - номінальний струм однієї вітки реактора
Асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором	$X_2 = \frac{U_{ном}^2 \cos \phi_{ном} \cdot 10^3}{P_{кп}} \times \sin \phi_{п}.$ $\cos \phi_{п} = \cos \phi_{ном} \cdot \left[\frac{M_m \cdot \eta_n}{M_n (1-s_n) k_n} + \gamma k_n (1-\eta_n) \right].$ <p>Формула розрахунку $\cos \phi_{п}$ наведена в [8].</p> <p>$\gamma=0,333$ - відношення втрат в міді до номінальних втрат у двигуні</p> <p>Сковзання $s_v = [v \pm (1 - s_{ном})] / v$ [9].</p>	$X_v = K_x X_2 v,$ <p>де K_x - коефіцієнт, що враховує вплив витеснення струму в провідниках на індуктивні опори елементів (для діапазона частот 100-1250 Гц)</p>	P - потужність двигуна, кВт; $\cos \phi_{ном}$ - номінальний коефіцієнт потужності; k_n - кратність пускового тока; ϕ_n - кут між струмом і напругою в момент пуска; $K_x = 0,78$; $k_{п}$ - відношення пускового струму до номінального; M_m - відношення максимального моменту до номінального; $M_{п}$ - відношення пускового моменту до номінального; s_n - номінальне сковзання.
Силовий трансформатор	$Z_2 = \frac{u_k U_{\delta}^2 \cdot 10}{S_{ном}};$ $R_2 = \frac{1000 \Delta P_k U_{ном}^2}{S_{ном}^2};$ $X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2}.$	$X_v = K_x X_2 v$ $R_v = R_2 \cdot (0,96 + 0,5 \cdot v^{1,4})$	ΔP_k - втрати в обмотках силового трансформатора, кВт; u_k - напруга КЗ трансформатора, %; U_{δ} - базисна напруга, кВ; $S_{ном}$ - номінальна потужність трансформатора, кВ·А.

Порядок розрахунку резонансної частоти. Визначаються числові значення елементів наведеної на рис. 2 ЕПС з урахуванням базової напруги, що приймається $U_{\delta}=6,3$ кВ. Розрахунок проводиться для кожної гармоніки та для кожної секції КУ. Розрахунок опору КУ, з'єднаної в трикутник, проводиться згідно публікації [5].

Спочатку розглядається послідовний контур, створений віткою здвоєного реактора та КУ. Індуктивність вітки реактора дорівнює: $L = \frac{X_2}{2\pi f}$. Резонансна частота в контурі, що складається з вітки здвоєного струмообмежувального

реактора, КУ дорівнює [10]: $f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Добротність контуру згідно [10]

Q дорівнює: $Q = \frac{1}{R_{екв}} \sqrt{\frac{L_{екв}}{C_{екв}}}$. Полоса пропускання визначається за формулою:

$$\Delta f = f_{рез} / (2Q).$$

Вищенаведені розрахунки необхідно проводити для кожної ступені КУ. Якщо розрахунки доведуть, що якщо для певної ємності КУ спостерігається співпадіння резонансної частоти з урахуванням полоси пропускання з частотою непарних гармонік, кратних 50 Гц, то може виникнути резонанс напруг. Тому таку ємність КУ підключати до мережі необхідно заборонити. Результати розрахунку викладені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення резонансної частоти у послідовному контурі

Кількість секцій КУ	Ємність фази однієї секції КУ, Ф	Індуктивність однієї вітки зведеного реактора, Гн	Резонансна частота, Гц	Еквівалентний опір вітки з КУ, Ом	Добротність контуру	Полоса пропускання, Гц
1	0,000048	0,00067	886,6	0,026	143,2	3,1
2	0,000097	0,00067	626,9	0,026	101,2	3,1
3	0,000145	0,00067	511,9	0,026	82,7	3,1

Після цього знаходиться еквівалентний опір та резонансна частота в колі, де ДВГ знаходиться зовні його (схема заміщення такого контуру наведена на рис. 3, а) та в колі, де ДВГ підключено до індуктивного навантаження (схема заміщення такого контуру наведена на рис. 3, б).

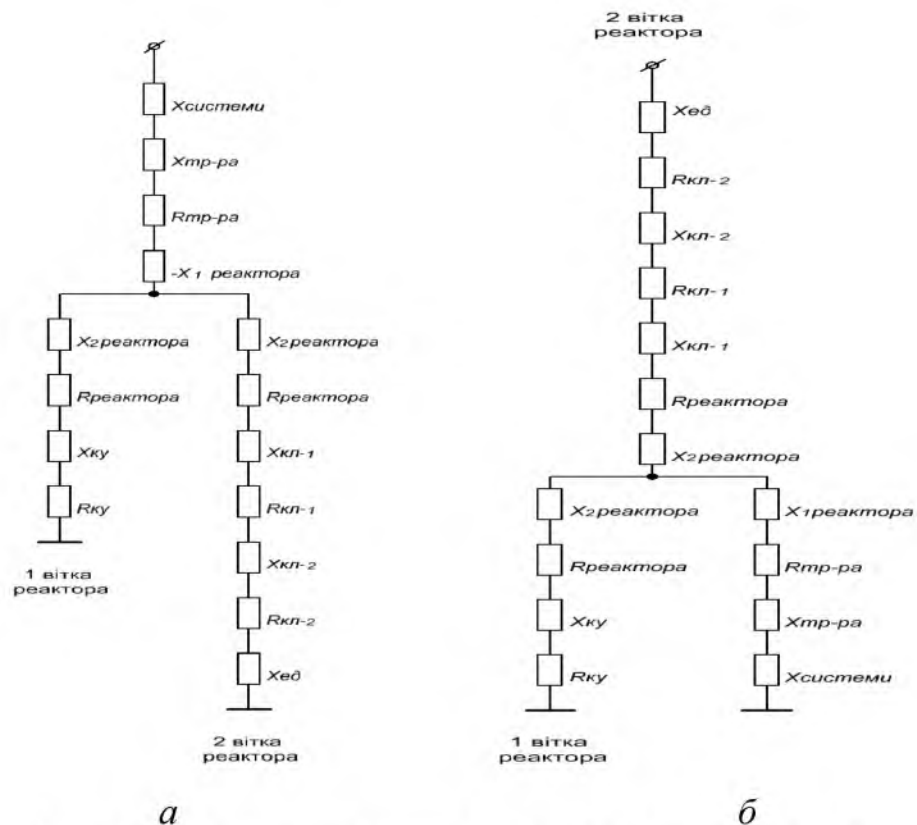


Рис. 3 – Схеми заміщення мережі для двох варіантів підключення ДВГ а – ДВГ знаходиться зовні віток реактору; б – ДВГ знаходиться у вітці з асинхронними електродвигунами

Основні розрахункові формули для режиму 1 (ДВГ знаходиться зовні паралельного контуру) мають вигляд:

Активний опір вітки 1 дорівнює $R_{екв1} = R_p + R_{КУ}$. Реактивний опір вітки 1 дорівнює $X_{екв1} = X_{2p} + X_{КУ}$. Еквівалентна ємність вітки 1 дорівнює для номера гармоніки v : $C_{екв} = 1 / (2\pi f v X_{екв1})$. Активний опір вітки 2 дорівнює: $R_{екв2} = R_p + R_{КЛ1} + R_{КЛ2}$. Реактивний опір вітки 2 дорівнює: $X_{екв2} = X_{2p} - X_{КЛ1} - X_{КЛ2} + X_{ЕД}$. Еквівалентна індуктивність вітки 2 для номера гармоніки v дорівнює: $L_{екв} = X_{екв2} / (2\pi f v)$.

Резонансна частота в контурі, що складається з віток зведеного струмообмежувального реактора, КУ, підключеної до однієї вітки та активно-індуктивного навантаження, що містить джерело вищих гармонік, дорівнює [10]:

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{екв} C_{екв}}} \sqrt{\frac{R_{екв1}^2 - \frac{L_{екв}}{C_{екв}}}{R_{екв2}^2 - \frac{L_{екв}}{C_{екв}}}}$$

Еквівалентний повний опір вітки 1 дорівнює:

$$\dot{Z}_{n \text{ екв1}} = R_p + nR_{Y\Phi} + j(X_{2p} - X_{КУ}) = R_p + nR_{Y\Phi} + j\left(X_{2p} - \frac{1}{100n\pi C_{Y\Phi}}\right),$$

де n – номер ступеню КУ ($n = 1$ або $n = 2$ або $n = 3$).

Еквівалентний повний опір вітки 2 дорівнює:

$$\dot{Z}_{n \text{ екв2}} = R_p + R_{КЛ1} + R_{КЛ2} + j(X_{2p} - X_{КЛ1} - X_{КЛ2} + X_{ЕД}),$$

де $X_{ЕД} = \frac{U_{ном}^2 \cdot \cos\varphi_{ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot I \cdot U \cos\varphi \cdot K_n} \cdot \sin\varphi_n$.

Еквівалентний повний опір кола дорівнює:

$$\dot{Z}_{екв} = R_{mp} + j(X_c + X_{mp} + X_{1p}) + \frac{\dot{Z}_{екв1} \dot{Z}_{екв2}}{\dot{Z}_{екв1} + \dot{Z}_{екв2}}$$

Знаючи еквівалентний повний опір кола, можливо знайти струм у колі для кожної гармоніки для номеру ступеню КУ n :

$$\dot{I}_{n \text{ екв}} = \frac{U}{\dot{Z}_{екв}}$$

Це значення необхідно знати для визначення струму, що проходить через ємність $I_C = I_{n \text{ екв1}}$ для тієї гармоніки, на якій спостерігається співпадіння резонансної частоти з частотою її.

Згідно [10]

$$\dot{I}_{n \text{ екв1}} = \dot{I}_{екв} \cdot \frac{\dot{Z}_{n \text{ екв2}}}{\dot{Z}_{n \text{ екв1}} + \dot{Z}_{n \text{ екв2}}}$$

Пропонується також визначити середньоквадратичне значення струму за формулою:

$$I_C = \sqrt{I_{C(1)}^2 + I_{C(3)}^2 + I_{C(5)}^2 + I_{C(7)}^2 + I_{C(9)}^2 + I_{C(11)}^2 + I_{C(13)}^2 + \dots + I_{C(n+1)}^2}$$

та контролювати величину I_C , щоб не було перевантаження КУ струмами вищих гармонік. А якщо відбувається перевантаження, то необхідно або зменшити

кількість підключених батарей КУ, або відключити її зовсім.

Основні розрахункові формули для режиму 2 (ДВГ знаходиться всередині паралельного контуру; АД підключені до мережі через перетворювачі частоти) мають вигляд:

Активний опір вітки 1 дорівнює $R_{екв1} = R_p + R_{КУ}$. Реактивний опір вітки 1 $X_{екв1} = X_{2p} + X_{КУ}$. Еквівалентна ємність вітки 1 дорівнює для номера гармоніки n $C_{екв1} = 1/(2\pi f_n X_{екв1})$. Активний опір вітки 2 дорівнює $R_{екв2} = R_{тр}$. Реактивний опір вітки 2 дорівнює $X_{екв2} = X_{1p} + X_c + X_{тр}$. Еквівалентна індуктивність вітки 2 для номера гармоніки n дорівнює $L_{екв2} = X_{екв2}/(2\pi f_n)$.

Еквівалентний повний опір вітки 1 дорівнює:

$$\dot{Z}_{n \text{ екв1}} = R_p + nR_{Y\Phi} + j(X_{2p} - X_{КУ}) = R_p + nR_{Y\Phi} + j\left(X_{2p} - \frac{1}{100\pi C_{Y\Phi}}\right),$$

де n – номер ступеню КУ ($n = 1$ або $n = 2$ або $n = 3$).

Еквівалентний повний опір вітки 2 дорівнює:

$$\dot{Z}_{n \text{ екв2}} = R_p + j(X_{1p} + X_{тр} + X_c).$$

Еквівалентний повний опір кола дорівнює:

$$\dot{Z}_{екв} = R_p + R_{КЛ1} + R_{КЛ2} + j(X_{2p} + X_{КЛ1} + X_{КЛ2} + X_{ЕД}) + \frac{\dot{Z}_{екв1}\dot{Z}_{екв2}}{\dot{Z}_{екв1} + \dot{Z}_{екв2}}.$$

Після цього знаходиться струм, що проходить через ємність

$I_c = I_{n \text{ екв1}}$ для тієї гармоніки, на якій спостерігається співпадіння резонансної частоти з частотою її та перевіряється ступінь перевантаження КУ струмом вищих гармонік.

Результати досліджень. В програмі Microsoft Excel проведені розрахунки резонансної частоти для кожної гармоніки та кожної з трьох секцій КУ. За допомогою програми Origin Lab [11], яка забезпечує добру візуалізацію одержаних результатів, побудовані графіки залежності резонансної частоти від номера гармоніки при різних ємностях КУ та потужності АД при місцезнаходженні ДВГ в зовнішній мережі та всередині контуру.

Результати досліджень наведені на рис. 4–6.

При збільшенні номеру гармоніки резонансна частота при визначених потужностях КУ та навантаження зменшується. При однаковій потужності КУ при збільшенні потужності навантаження резонансна частота в контурі також збільшується.

Якщо ДВГ знаходиться всередині паралельного контуру, то резонансна частота в такому контурі при однаковому номері гармоніки значно більше, ніж коли ДВГ знаходиться за межами контуру. При збільшенні потужності КУ при одній і тій самій потужності навантаження резонансна частота в контурі зменшується.

Розрахунки свідчать, що полоса пропускання резонансної частоти для зазначених умов знаходиться в інтервалі $0,2 \div 0,5$ Гц.

Для забезпечення ЕМС доцільно розраховувати в режимі реального часу резонансну частоту в паралельному контурі для уникнення співпадіння її з урахуванням полоси пропускання з частотою непарних гармонік, кратних 50 Гц [12], використовуючи дані електроспоживання в режимі реального часу.

Розрахунок опорів елементів ЕПС на підвищених частотах в паралельному контурі, що складається з віток зведеного реактора, з навантаженням індуктивного характеру та ємністю показує, що при певному номеру гармоніки вітка з конденсаторною установкою втрачає ємнісний характер. Чим менше співвідношення потужності навантаження до потужності КУ – тим швидше це відбувається.

Висновки

1. Доведено, що при наявності в мережі ДВГ в контурі, що складається з віток зведеного реактора, КУ, підключеної до однієї вітки та активно-індуктивного навантаження, підключеного до другої вітки, при певних потужностях КУ та навантаження може виникнути як резонанс струмів, так і резонанс напруг.

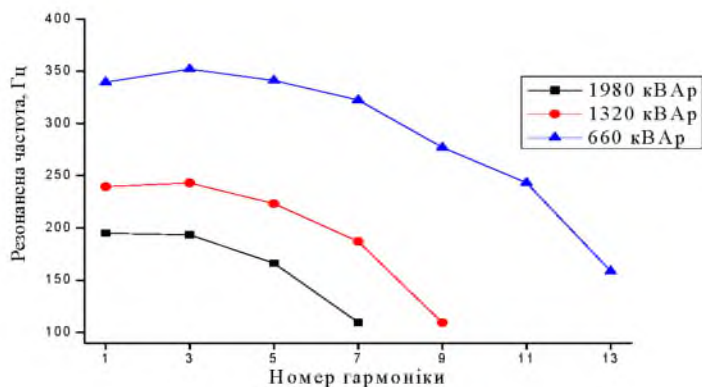


Рис. 4 – Залежність резонансної частоти від номера гармоніки при різних ємностях КУ при постійній потужності АД та місцезнаходженні ДВГ в зовнішній мережі

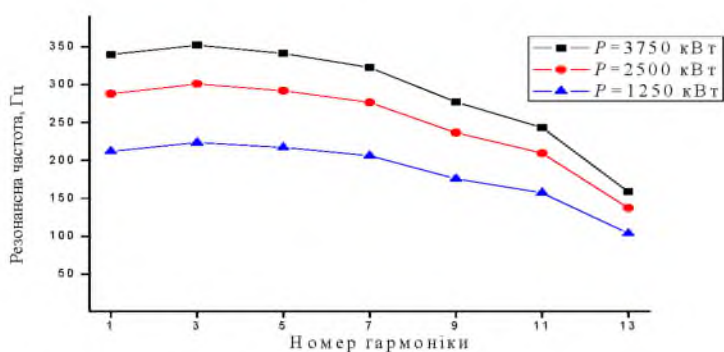


Рис. 5 – Залежність резонансної частоти від номера гармоніки при різних потужностях АД при постійній ємності КУ у випадку місцезнаходження ДВГ в зовнішній мережі

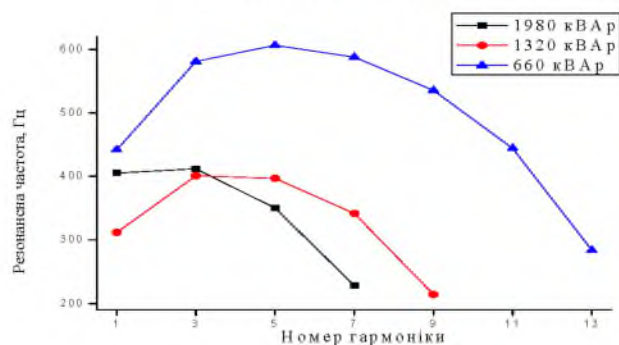


Рис. 6 – Залежність резонансної частоти від номера гармоніки при різних ємностях КУ при місцезнаходженні ДВГ в колі з АД

2. Розрахунки свідчать, що найбільшу небезпеку представляє випадок, коли ДВГ знаходиться не всередині контуру, а зовні.

3. Запропоновано для забезпечення ЕМС розраховувати, використовуючи дані електроспоживання в режимі реального часу, резонансну частоту в послідовному та паралельному контурах для уникнення співпадіння її з урахуванням полоси пропускання з частотою непарних гармонік, кратних 50 Гц.

Список літератури: 1. *Гатон, Д. А.* Особенности режима работы питающей сети во время плавного пуска мощных синхронных двигателей [Текст] / *Д.А. Гатон, Я.С. Бедерак* // Промышленная энергетика. – 2014. – №1. – С. 5 – 9. 2. *Куренный, Э. Г.* Эффективность применения сдвоенных реакторов [Текст] / *Э. Г. Куренный, И. В. Пушина, Н. Н. Погребняк, Сулейман Халед, Л. Е. Клименко* // Техническая электродинамика, 1991, №3. – С. 83-87. 3. *Жежеленко, И.В.* Электромагнитная совместимость потребителей [Текст] / *И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк, М. А. Нойбергер.* – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с. 4. Каталог продукции Сафоновского электромашиностроительного завода. Электронный ресурс <http://www.sez.ru/pdf/sez.pdf> 5. *Бедерак, Я. С.* Дослідження режиму роботи конденсаторних установок 6 (10) кВ, підключених до вітки здвоеного струмообмежувального реактора [Текст] / *Я. С. Бедерак, С. В. Олейнік, А. А. Шуляк* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – Вип. 2 (22). Частина 2. – С. 290 – 294. 6. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию : В 2 т. Т.1. Электроснабжение [Текст] / Под общ. ред. *А. А. Федорова.* – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 568 с. 7. *Стернин, В. Г.* Сухие токоограничивающие реакторы [Текст] / *В. Г. Стернин, А. К. Карпенский.* – М. - Л.: Энергия, 1965. – 256 с. 8. *Дьяков, В. И.* Типовые расчеты по электрооборудованию: Практ. пособие [Текст] / *В. И. Дьяков.* – М. : Высшая школа, 1991. – 160 с. 9. *Брускин, Д. Э.* Электрические машины и микромашины [Текст] / *Д. Э. Брускин, В. С. Хвостов.* – М. : Высшая школа, 1990. – 402 с. 10. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. [Текст] / *В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб;* За заг. ред. *І. М. Чиженка, В. С. Бойка.* – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272 с. 11. *Богданов, А. А.* Визуализация данных в Microcal Origin [Текст] / *А. А. Богданов.* – М., Альтекс-А, 2003. – 112 с. 12. *Бедерак, Я. С.* Необхідність впровадження моніторингу струму та напруги з різним характером навантаження в гілках здвоєних реакторів при наявності джерел вищих гармонік [Текст] / *Я. С. Бедерак* // Енергетика і електрифікація. – 2013. – №8. – С. 48–51.

Bibliography (transliterated): 1. *Gapon, D. A., Bederak, Ya. S.* (2014). Special aspects of work supply during soft-start high-power synchronous motors. Moscow: Industrial Energy, 1, 5-9. 2. *Kurennyj, Je. G., Pushnaja, I. V., Pogrebnyak, N. N., Sulejman Haled, Klimenko, L. E.* (1991). The efficacy of the dual reactors. Moscow: Tehnicheskaja jelektrodinamika, 3, 83-87. 3. *Zhezhelenko, I. V., Shidlovskij, A. K., Pivnyak, G. G., Nojberger, M. A.* (2012). The electromagnetic compatibility of the consumers. Moscow: Mashinostroenie, p. 351. 4. *Product catalog of Electric Factory of the Safonov.* (2014). <http://www.sez.ru/pdf/sez.pdf> 5. *Bederak, Ya. S., Olejnik, S. V., Shuljak, A. A.* (2013). Investigation operating mode of condenser installations 6 (10) kV connected to the dual branch limiting current reactor. Kremenchug: Elektromehanichni i energozberigajuchi sistemi. Ed. 2 (22). Part 2, 290-294. 6. *Handbook of electricity and electrical equipment: V.1. Jelektrosnabzhenie* (1986). Pod obshh. red. *A. A. Fedorov.* Moscow: Jenergoatomizdat, p. 568. 7. *Sternin, V. G., Karpenskij, A. K.* (1965). Dry current limiting reactors. Moscow: Jenergija, p. 256. 8. *D'jakov, V. I.* (1991). The model calculations of electrical equipment. Moscow: Vysshaja shkola, p.160. 9. *Bruskin, D. Je.* (1990). Electrical machines and micromachines. Moscow: Vysshaja shkola, p. 402. 10. *Bojko, V. S., Bojko, V. V., Vidolob, Ju. F.* (2004). Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 1: Established linear electrical circuits with lumped parameters. Kyiv: Vidavnictvo «Politehnika, p. 272. 11. *Bogdanov, A. A.* (2003). Data Visualization in Microcal Origin. Moscow: Al'teks-A, p. 112. 12. *Bederak, Ya. S.* (2013). The need for monitoring implementation of current and voltage with varying nature of the load in the branches twin reactor in the presence of higher harmonics sources. Kyiv: Energetika i elektrifikacija, 48-51.

Надійшла (received) 11.12.2014

І. А. АЛЕКСЕЄВ, канд. техн. наук, доц., ДДТУ, Дніпродзержинськ;
О. В. САДОВОЙ, д-р техн. наук, проф., прорек., ДДТУ, Дніпродзержинськ;
А. І. ТРИКІЛО, канд. техн. наук, доц., ДДТУ, Дніпродзержинськ;
М. В. БАБЕНКО, канд. техн. наук, доц., ДДТУ, Дніпродзержинськ

ПРЕЦИЗИЙНИЙ ГЕНЕРАТОР ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСІВ ОДНОДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Наведений приклад побудови прецизійного генератора робочої частоти на базі чипу AD 9832 компанії Analog Devices, що реалізує метод прямого цифрового синтезу (DDS) та інвертора напруги, який ним керується, для живлення високочастотних кіл системи однодротової передачі електричної енергії, які підтримують функцію динамічної зміни та установки робочої частоти за цифровим каналом керування. Це дозволило досягти у прецизійному генераторі живлення високочастотних кіл комплексу однодротової передачі електричної енергії лінійної навантажувальної характеристики при ККД більше 90 %.

Ключові слова: частота, генератор, DDS-синтез, високочастотний, однодротова, передача, енергія, система, цифрова, живлення.

Вступ. Більше ста років тому Нікола Тесла опублікував результати своїх дослідів з резонансного метода передачі електричної енергії [1, 2]. Першим на території СНД однодротову систему передачі електричної енергії впровадив «Газпром» (Росія) і спонсорував виготовлення відповідної установки потужністю 20 кВт[3]. Уздовж газопроводів технологічно прокладають лінії електропередачі для катодного захисту, живлення насосів для перекачування та інших експлуатаційних служб. При однодротовій передачі енергії стало можливим протягнути сталевий дріт, а на деяких ділянках газопроводу навіть здійснити передачу енергії по самій трубі. За результатами експлуатації такої системи отримали в сотні разів кращі електричні параметри (ККД більше 90%), ніж для традиційних двопровідних та трипровідних.

Мета роботи. Основною метою даної роботи є розробка методики побудови прецизійного генератора робочої частоти та інвертора напруги, який ним керується, для підсистем живлення високочастотних кіл комплексу однодротової передачі електричної енергії, що підтримують функцію цифрової установки робочої частоти.

Постановка завдання. Попередньо проведені в лабораторних умовах кафедри електротехніки та електромеханіки Дніпродзержинського державного технічного університету експериментальні дослідження однодротової резонансної системи передачі електричної енергії показали, що для стійкого її функціонування в області високого сумарного ККД необхідно підтримувати робочу частоту комплексу в межах $270 \text{ кГц} \pm 100 \text{ Гц}$ [4,5]. Крім того, в реальних умовах експлуатації необхідним є наявність функції автоматичного вибору робочої частоти в залежності від зміни параметрів навантаження та електричних характеристик каналу передачі енергії.

Матеріал і результати роботи. Прямий цифровий синтез (DDS) - метод, що дозволяє отримати аналоговий сигнал за рахунок генерації тимчасової послідовності цифрових відліків для їх подальшого перетворення в аналогову форму за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). DDS унікальний своєю цифровою визначеністю: сигнал, що генерується ним, синтезується з властивою цифровим системам точністю [6,7]. Частота, амплітуда і фаза сигналу в будь-який момент часу точно відомі і контрольовані.

На рис. 1 показана функціональна схема синтезатора DDS: його основними вузлами є накопичувач значення фази (акумулятор фази), засіб перетворення значення фази в амплітуду (зазвичай це постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) з табличними значеннями функції синуса) і ЦАП. Частота вихідного сигналу визначається двома параметрами: частотою тактового сигналу і двійковим числом, записаним у регістр частоти. Це двійкове число подається на вхід акумулятора фази. Якщо використовується ПЗП з табличними значеннями синуса, то акумулятор фази обчислює адресу (відповідає миттєвому значенню фази) і подає його на вхід ПЗП, при цьому на виході ПЗП отримуємо поточне значення амплітуди в цифровому вигляді.

Для генерації синусоїди з фіксованою частотою постійна величина (приріст фази, обумовлений двійковим числом, записаним у регістр частоти) додається до значення, що зберігається в акумуляторі фази, з кожним імпульсом тактового сигналу.

Якщо значення приросту велике, акумулятор фази буде швидко пробігати всю таблицю синуса, що зберігається в ПЗП, і частота сигналу при цьому буде висока. Якщо значення приросту фази мале, акумулятору фази знадобиться більше кроків, щоб пройти всю таблицю ПЗП, і відповідно частота сигналу на виході буде низькою (рис. 2).

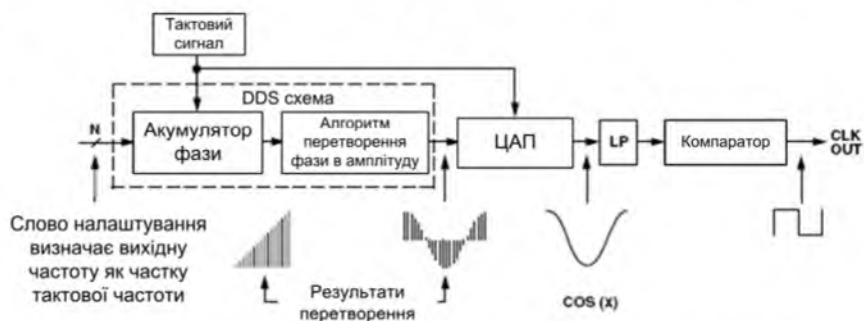


Рис. 1 – Блок схема типового DDS - синтезатора частоти

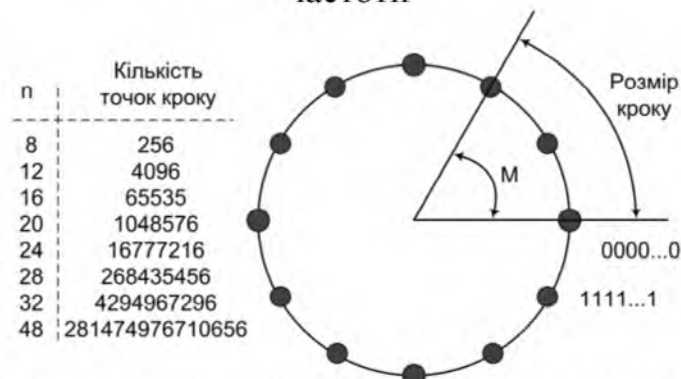


Рис. 2 – Циклічний розрахунок фази DDS - синтезатора частоти

Принципова схема розробленого генераторного блоку наведена на рис. 3. Схема побудована на базі мікроконтролера ATmega8.

Для тактування DDS-синтезатора AD9832 використовується генератор стабільної частоти, побудований на мікросхемі К531ГГ1[8], яка являє собою два вбудованих генератора імпульсів, частота яких визначається або п'єзо

резонатором, що підключається до виводів C1 та C2, або конденсатором, який підключається замість резонатора. В останньому випадку з'являється можливість змінювати частоту генерації шляхом зміни напруг, що прикладені до виводів Uд та Uч. У наведеній схемі частота імпульсів визначається кварцовим резонатором та складає 8 МГц.

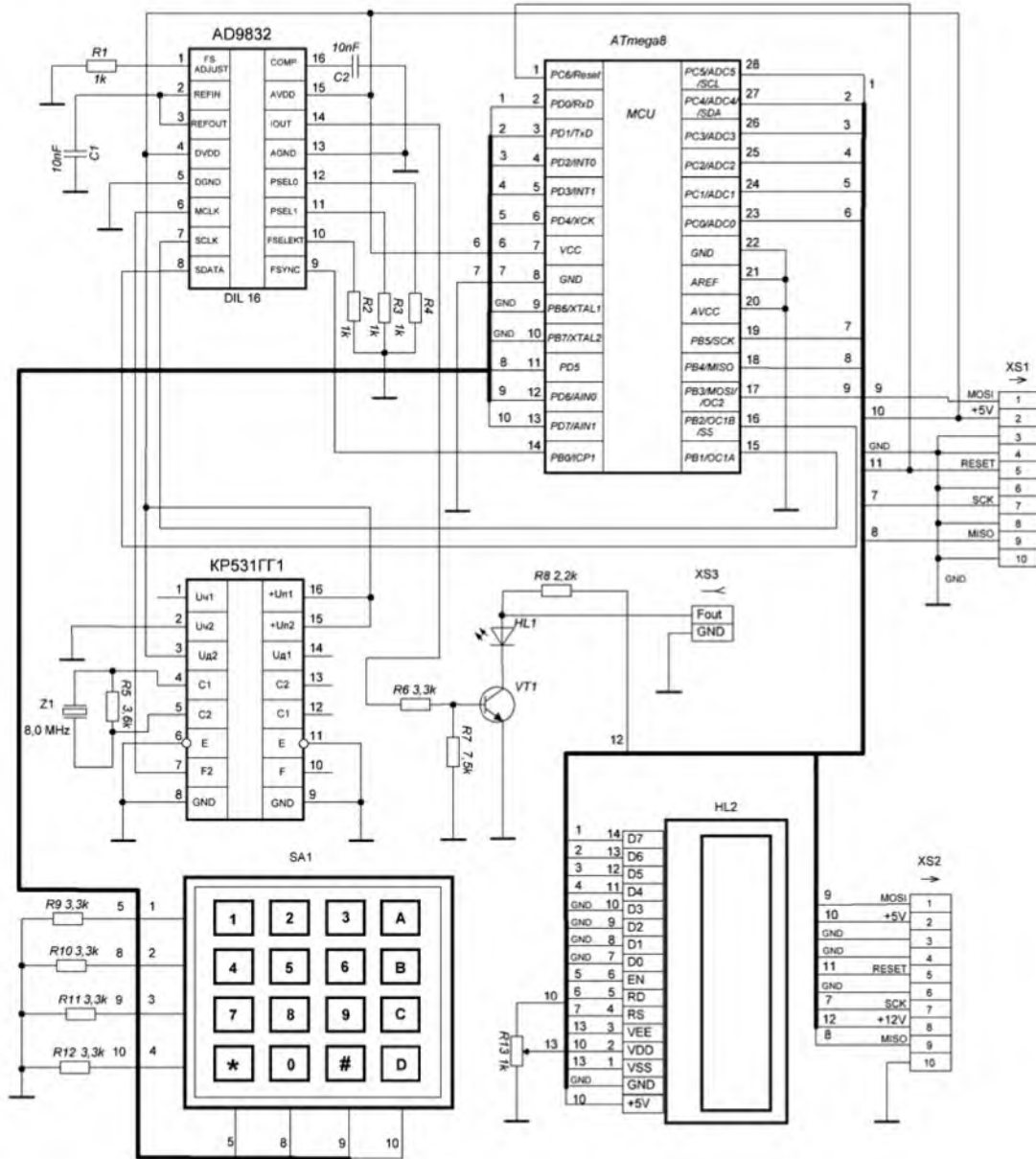


Рис. 3 – Принципова схема генераторного блоку на базі DDS-синтезатора AD9832

Клавіатура призначена для введення користувачем початкового значення робочої частоти, яка відображається на LCD дисплеї. Після натискання кнопки «*» мікропроцесор перепрограмує DDS-синтезатор AD9832.

Програмно алгоритм запису частоти має наступний вигляд.

1. Ініціалізація мікроконтролера і портів введення / виведення:

- Сигнали на виводах AD 9832: ($DDS_FSYNC = 1$, $DDS_SCLK = 0$, $DDS_SDATA = 0$)

- Виконуємо затримку на кілька десятків мілісекунд (підбирається експериментально) щоб дати можливість стабілізуватися живленню на DDS (там зазвичай ставлять конденсатори великої ємності) і тактовому генератору вийти в робочий режим.

2. Ініціалізація DDS.

- Виконуємо програмне скидання AD9832:

($SLEEP = 1$, $RESET = 1$, $CLR = 1$: $0b1111|1дю000|0000|0000 = 0xf800$;

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо старший байт $0b11111000$ (порядок біт - MSB - від старшого до молодшого);

- передаємо молодший байт $0b00000000$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

3. Перший раз встановлюємо значення вихідної частоти:

Частота розраховується наступним чином:

$$F_{OUT} = \frac{FREG0 \cdot Fmclk}{2^{32}} \quad (1)$$

де: F_{OUT} - частота на виході DDS, Гц (200000 Гц в цьому прикладі), $FREG0$ - значення регістра, що визначає частоту (32 біт), $Fmclk$ - тактова частота DDS, Гц (8 МГц у цьому прикладі) $2^{32} = 4\,294\,967\,296$.

Вирішуючи рівняння щодо $FREG0$, знаходимо:

$$FREG0 = (F_{OUT} / Fmclk) \cdot 2^{32} \quad (2)$$

$$FREG0 = (200000 / 8000000) \cdot 2^{32} = 1476395008 = 0x66666666 \quad (3)$$

Пишемо старший (3-й) байт $FREG0$:

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо байт $0b00110011$ (вибір 3-го байта з $FREG0$);

- передаємо байт $0b0101|1000 = 0x66$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

Пишемо 2-й байт $FREG0$:

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо байт $0b00100010$ (вибір 2-го байта з $FREG0$);

- передаємо байт $0b0000|0000 = 0x00$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

Пишемо 1-й байт $FREG0$:

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо байт $0b00110001$ (вибір 1-го байта з $FREG0$);

- передаємо байт $0b0000|0000 = 0x00$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

Пишемо молодший (0-й) байт $FREG0$

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо байт $0b00100000$ (вибір 0-го байта з $FREG0$);

- передаємо байт $0b0000|0000 = 0x00$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

4. Переводимо DDS в оперативний режим ($SLEEP = 0$, $RESET = 0$, $CLR = 0$);

- $DDS_FSYNC = 0$;
- передаємо старший байт 0b1100|0000;
- передаємо молодший байт 0b00000000;
- $DDS_FSYNC = 1$.

Після останньої команди DDS видає на виході 200000 Гц. Надалі при перебудові DDS виконуються тільки пункти 3-4.

На рис. 4 наведено принципову схему інвертора напруги побудованого на базі чипу IR2111. Даний чип є високошвидкісним, високовольтним драйвером для MOSFET та IGBT транзисторів, що включені за схемою напівмостового інвертора напруги. Драйвери International Rectifier мають ряд важливих функцій: захист від

короткого замикання (Short Circuit Protection), захист від перевантаження по струму (Overcurrent Protection), захист від замикання затворів при низьких напругах живлення та керування (Under Voltage LockOut UVLO).

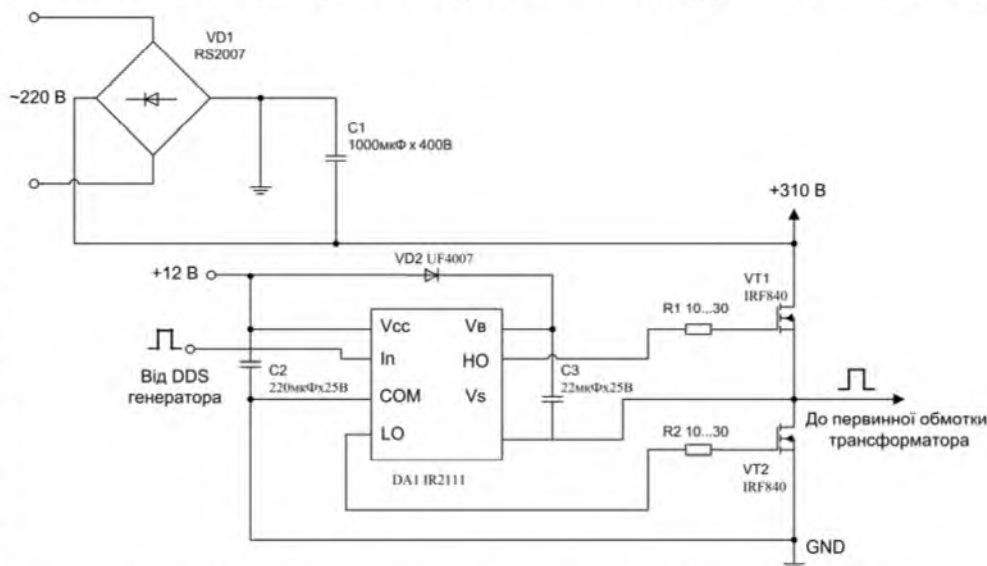


Рис. 4 – Принципова схема інвертора напруги

На вхід In драйвера надходить сигнал з DDS-генератора, в такт з яким здійснюється почергове вмикання та вимикання ключів VT1 та VT2. Діод VD2 та конденсатор C3 разом утворюють бутстрепну схему керування верхнім ключем VT1. Для цього діод VD2 обов'язково повинен бути ультрашвидким, а конденсатор C3 бажано використовувати танталовий.

Експериментальні дослідження розробленого прецизійного генератора живлення для системи однодротової передачі електричної енергії підтвердили його працездатність в діапазоні частот від 0 до 350 кГц (верхня межа обмежується можливостями драйвера IR2111) з точністю до ± 1 Гц при майже лінійній навантажувальній характеристиці та ККД у межах 91–95 %.

Висновки

1. Використання DDS-синтезатора частоти дозволяє побудувати прецизійний генератор з унікальною цифровою визначеністю: сигнал, що генерується ним, синтезується з властивою цифровим системам точністю. Частота і фаза сигналу в будь-який момент часу точно відомі і контрольовані. Генератори, побудовані на базі DDS, практично не схильні до температурного дрейфу і старіння.

2. Використання сучасних методів синтезу та електронних компонентів дозволило досягти у прецизійному генераторі живлення високочастотних кіл комплексу однодротової передачі електричної енергії лінійної навантажувальної характеристики при ККД більше 90 %.

Список літератури: 1. *Тесла Н.* Статті [Текст] / [наук. ред. *Абрамович В.* та ін.]. – Самара: Издательский дом «Агни», 2008. – 584 с.: іл. - ISBN 978-5-89850-078-8. 2. *Тесла Н.* Колорадо-Спрингс. Дневники. 1899-1900 [Текст] / [наук. ред. *Абрамович В.* та ін.]. – Самара: Издательский дом «Агни», 2008. – 460 с.: іл. - ISBN 978-5-89850-100-6. 3. *Стребков Д. С.* Резонансные методы передачи электрической энергии / *Д. С. Стребков, А. И. Некрасов* Под редакцией академика РАСХН *Д. С. Стребкова*. Издание второе. – Москва: ВИАЭСХ, 2006. – 304 с. - ISBN 978-5-85941-134-4. 4. *Садовой А. В.* Исследование параметров резонансных трансформаторов в системе однопроводной передачи электрической энергии [Текст] / *А. В. Садовой, И. А. Алексеев, А. И. Трикило* // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки)/Дніпродзержинськ: ДДТУ.-2011. – Випуск 2(17). – С.181-185. 5. *Садовой А. В.* Экспериментальные исследования параметров резонансных трансформаторов в системе однопроводной передачи электрической энергии [Текст] / *А. В. Садовой, И. А. Алексеев, А. И. Трикило* // Журнал электротехнические и компьютерные системы. – Київ : - 2014. - № 15(91). – С.367-369. 6. *Мёрфи Е.* Все о синтезаторах DDS [Текст] / *Мёрфи Е., Слэттери К.* // Журнал компоненты и технологии. – Санкт-Петербург : - 2005. - № 1. – С.21-25. 7. Direct Digital Synthesis (DDS) & Modulators [Electronic resource] // Official website of the company International Rectifier. – Mode of access: WWW.URL: <http://www.analog.com/ru/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/products/index.html#>. - Last access: 2014. – Title from the screen. 8. *Бирюков С. А.* Применение интегральных микросхем серий ТТЛ [Текст] / *С. А. Бирюков*, - М. : «Патриот», 1992. – 117 с. 9. *Мэк Р.* Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению [Текст] / *Мэк Р.* – Пер. с англ.-М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008.- 272 с.: ил. ISBN 978-5-94120-172-3. 10. *Семенов Б. Ю.* Силовая электроника: от простого к сложному [Текст] / *Б. Ю. Семенов*. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с. : ил. (Серия «Библиотека инженера»). - ISBN 5-98003-223-1.

Bibliography (transliterated): 1. *Abramovich V. Tesla N.* Stat'i [Tesla N. Articles], (2008), Moscow, Russian Federation, Agni Publishing House, 584 p. (In Russian). 2. *Abramovich V. Tesla N.* Colorado-Springs. Dnevniky. 1899-1900 [Tesla N. Colorado-Springs. Diary. 1899-1900], (2008), Moscow, Russian Federation, Agni Publishing House, 460 p. (In Russian). 3. *Strebkov D. S.* Rezonansnye metody peredachi elektricheskoi energii [Resonance methods of electric power transmission], (2008), Moscow, Russian Federation, 304 p. (In Russian). 4. *Sadovoi A. V., Alekseev I. A., Trikiilo A. I.* Issledovanie parametrov rezonansnykh transformatorov v sisteme odnoprovodnoi peredachi elektricheskoi energii [Research of parameters of resonant transformers in the system of single-wire power transmission], (2011), Zbimik naukovikh prats' Dniprodzerzhins'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu: (tekhnichni nauki), Dniprodzerzhins'k, Ukraine, Vol. 2(17), pp. 181 – 185 (In Russian). 5. *Sadovoi A. V., Alekseev I. A., Trikiilo A. I.* Eksperimental'nye issledovaniya parametrov rezonansnykh transformatorov v sisteme odnoprovodnoi peredachi elektricheskoi energii [Experimental research of resonant transformers in the system of single-wire electric power transmission], (2014), Zhurnal elektrotekhnicheskije i komp'yuternye sistemy, Kiev, Ukraine, № 15(91), pp. 367 – 369 (In Russian). 6. *Merfi E., Sletteri K.* Vse o sintezatorakh DDS [All about synthesizers DDS], (2005), Zhurnal komponenty i tekhnologii, St-Petersburg, Russian, № 1, pp. 21 – 25 (In Russian). 7. Direct Digital Synthesis (DDS) & Modulators [Electronic resource] // Official website of the company International Rectifier. – Mode of access: WWW.URL: <http://www.analog.com/ru/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/products/index.html#>. - Last access: 2014. – Title from the screen. 8. *Biryukov S. A.* Primenenie integral'nykh mikroskhem serii TTL [The use of integrated circuits series TTL], (1992), Moscow, Russian Federation, Patriot Publ., 117p. (In Russian). 9. *Mek R.* Impul'snye istochniki pitaniya. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu [Switching power supplies. Theoretical bases of designing and application guidance], (2008), Moscow, Russian Federation, Publishing house Dodeka XXI Publ., 272 p. (In Russian). 10. *Semenov B. Yu.* Silovaya elektronika: ot prostogo k slozhnomu [Power electronics: from simple to complex], (2005), Moscow, Russian Federation, SOLON-Press Publ., 416 p. (In Russian).

Надійшла (received) 17.12.2014

Р. С. ВОЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук, ДДТУ, Днепродзержинск;
А. В. САДОВОЙ, д-р техн. наук, проректор, ДДТУ, Днепродзержинск

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ ОБОБЩЕННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ УРАВНЕНИЕМ НАБЛЮДАЕМОСТИ

Обзор работ, посвященных использованию методов линеаризации нелинейных уравнений, показал преимущества и недостатки линеаризации обратными связями по выходу и определил цель исследования. Для достижения поставленной цели уравнения движения обобщенного электромеханического объекта в псевдоаффинной форме дополнены уравнениями фильтра в матричной форме. Путем использования методов дифференциальной геометрии обоснована структура и параметры линеаризующего регулятора.

Ключевые слова: линеаризация обратными связями, динамическая система, нелинейный электромеханический объект, линеаризующий регулятор

Введение. В настоящее время одним из самых эффективных методов линеаризации нелинейных объектов, который не приводит к пренебрежению их уникальными свойствами, является линеаризация обратными связями. Совершенствованию и использованию этого метода посвящено большое количество работ как на территории бывшего СССР [1–5], так и во всем мире [6–10].

Общим недостатком указанных работ является предположение о алгебраической зависимости выходной измеряемой координаты от переменных состояния объекта. Это предположение является весьма грубым, поскольку в реальных технических системах сигналы, получаемые с датчиков, подвергаются фильтрации, а неподдающиеся непосредственному измерению координаты восстанавливаются при помощи наблюдающих устройств. Процесс фильтрации и наблюдения описывается дифференциальными уравнениями и сопровождается не только изменением амплитуды сигнала, но и вносит запаздывание. Пренебрежение этими факторами на этапе математического описания динамики объекта управления может привести к снижению запаса устойчивости замкнутой системы и вызвать возникновение слабодемпфированных колебаний. Поэтому работа, устраняющая указанные недостатки, является актуальной.

Цель работы. Целью работы является определение линеаризующего управляющего воздействия для обобщенной электромеханической системы (ЭМС) с фильтрованием сигнала обратной связи по регулируемой координате.

Методика исследования нелинейных ЭМС. Динамику обобщенной полностью управляемой электромеханической системы с одним входом в общем случае можно описать нелинейными дифференциальными уравнениями, представленными в нормальной форме в матричном виде [9]

$$pY = F(Y, u), \quad (1)$$

где $Y = (y_1 \dots y_n)^T$ - вектор переменных состояния, n - порядок системы управления, u - управляющее воздействие, F - вектор функций, описывающих

динамику системы управления.

Поскольку линеаризация обратными связями разработана для аффинных систем, представим уравнения (1) в псевдоаффинной форме

$$p\mathbf{Y} = \Phi(\mathbf{Y}, u) + \mathbf{G}u, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{G} = (0 \ \dots \ 0 \ 1)^T, \quad \Phi = (f_1(\mathbf{Y}, u) \ \dots \ f_{n-1}(\mathbf{Y}, u) \ f_n(\mathbf{Y}, u) - u)^T. \quad (3)$$

Дополним уравнение (2) дифференциальным уравнением наблюдаемости

$$p^k \hat{y}_j = H_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}), \quad (4)$$

где k - порядок дифференциального уравнения, описывающего динамику наблюдающего устройства, $H_d(\cdot)$ - некоторая дифференциальная зависимость, описывающая динамику наблюдающего устройства, $\hat{\mathbf{Y}}$ - вектор переменных состояния наблюдателя j -ой координаты

$$\hat{\mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} \hat{y}_j & p\hat{y}_j & \dots & p^{k-1}\hat{y}_j \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Представим дифференциальное уравнение (4) в виде системы k -го порядка

$$p\hat{y}_i = \hat{y}_{i+1}; \quad i = j, \dots, k-1, \quad p\hat{y}_k = H_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}), \quad (6)$$

Или

$$p\hat{\mathbf{Y}} = \tilde{\mathbf{H}}_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}), \quad (7)$$

где

$$\tilde{\mathbf{H}}_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}) = \begin{pmatrix} \hat{y}_j & \dots & \hat{y}_{k-1} & H_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}) \end{pmatrix}^T. \quad (8)$$

Уравнения (7) позволяют сформулировать следующую теорему: *Дифференциальные уравнения наблюдаемости (7) являются обобщением известного уравнения наблюдаемости*

$$\hat{y}_j = H_a(\mathbf{Y}) \quad (9)$$

и позволяют путем введения производных от задающего воздействия расширить класс управляющих воздействий, линеаризующих динамику исходного нелинейного электромеханического объекта.

В уравнении (9) $H_a(\cdot)$ - алгебраическая зависимость, определяющая взаимосвязь переменных состояния объекта с наблюдаемой координатой.

В качестве доказательства линеаризуем динамическую систему, которая описывается уравнениями (2) и (4) по выходу. Для этого найдем полную производную правой части последнего уравнения системы (6)

$$p\left(p\hat{y}_k\right) = p^{k+1}\hat{y}_j = p H_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}) = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} p\mathbf{Y} + \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\hat{\mathbf{Y}}} p\hat{\mathbf{Y}}. \quad (10)$$

С учетом правых частей уравнений (2) и (7) выражение (10) примет вид

$$p^{k+1} \hat{y}_j = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \Phi(\mathbf{Y}, u) + \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \mathbf{G}u + \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\hat{\mathbf{Y}}} \tilde{\mathbf{H}}_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}) \quad (11)$$

Слагаемые правой части уравнения (11) представляют собой производные Ли, которые определяются выражениями

$$L_{\Phi} H_d = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \Phi(\mathbf{Y}, u); \quad L_{\mathbf{G}} H_d = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \mathbf{G}; \quad (12)$$

$$L_{\tilde{\mathbf{H}}_d} H_d = \frac{dH_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}})}{d\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{H}}_d(\mathbf{Y}, \hat{\mathbf{Y}}).$$

С учетом производных Ли (12) уравнение (11) будет

$$p^{k+1} \hat{y}_j = L_{\Phi} H_d + L_{\mathbf{G}} H_d u + L_{\tilde{\mathbf{H}}_d} H_d. \quad (13)$$

Как и в известном случае алгебраического уравнения наблюдаемости (9), линеаризация обратными связями по выходу при использовании дифференциального уравнения наблюдаемости (7) сводится к рекурсивному r -кратному дифференцированию уравнения (11). Условием прекращения дифференцирования является ненулевая производная Ли $L_{\mathbf{G}} H_d$, определяющая влияние управляющего воздействия u на $r+k$ -ую производную наблюдаемой величины. При этом уравнение (13) примет вид

$$p^{r+k} \hat{y}_j = \sum_{i=1}^r L_{\Phi}^i H_d + \sum_{i=1}^r L_{\tilde{\mathbf{H}}_d}^i H_d + \sum_{i,j=1}^{r-1} L_{\Phi}^i L_{\tilde{\mathbf{H}}_d}^j H_d + \sum_{i,j=1}^{r-1} L_{\tilde{\mathbf{H}}_d}^j L_{\Phi}^i H_d + L_{\mathbf{G}} L_{\Phi}^{r-1} H_d u. \quad (14)$$

Второе, третье и четвертое слагаемые уравнения (14) определяются компонентами матрицы $\tilde{\mathbf{H}}_d$, которые в силу выражения (8) зависят от траекторий движения наблюдающего устройства. Таким образом, в отличие от классической линеаризации обратными связями по выходу в рассматриваемом случае вводится не только новое управляющее воздействие v , заменяющее r -ую производную от наблюдаемой величины

$$p^r \hat{y}_j = v, \quad (15)$$

но и ряд производных от нового управляющего воздействия

$$p^{r+i} \hat{y}_j = p^i v; \quad i = 1, \dots, k. \quad (16)$$

Подстановка производных (15) и (16) в уравнение (14) и выполнение соответствующих алгебраических преобразований, позволяет представить уравнение (14) следующим образом

$$p^k v = W(\mathbf{Y}, u, \mathbf{V}), \quad (17)$$

где $W(\cdot)$ - результат преобразования правой части уравнения (14)

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v & pv & \dots & p^{k-1}v \end{pmatrix}^T. \quad (18)$$

Решение уравнения (17) относительно управляющего воздействия u будем искать в виде

$$u = W^{-1}(Y, V, p^k v) \quad (19)$$

или с учетом матрицы (18)

$$u = W^{-1}(y_1, \dots, y_n, v, pv, \dots, p^k v). \quad (20)$$

В отличие от классической линеаризации обратными связями, полученное управляющее воздействие зависит от n переменных состояния рассматриваемого объекта и k первых производных от задающего воздействия v . Теорема доказана.

Следствие теоремы: Если наблюдающее устройство, определяющее регулируемую координату электромеханического объекта, является инерционным и описывается системой k дифференциальных уравнений, то для компенсации этой инерционности в состав линеаризующего регулятора помимо звеньев, выполняющих алгебраические операции, должны быть включены k дифференцирующих звена.

Обсуждение результатов использования предложенной методики. В качестве примера линеаризуем обобщенный электромеханический объект первого порядка с апериодическим звеном первого порядка в канале обратной связи по скорости.

Дифференциальное уравнение объекта управления имеет вид

$$T_m p \omega + \omega = u / c, \quad (21)$$

где T_m - электромеханическая постоянная времени, c - конструктивный коэффициент, ω - скорость двигателя, u - напряжение питания.

Сигнал в канале обратной связи формируется в соответствии с уравнением

$$T p \hat{\omega} + \hat{\omega} = K \omega, \quad (22)$$

где T и k - постоянная времени и коэффициент передачи фильтра в канале обратной связи. Представим уравнения (21) и (22) в нормальной форме

$$p \omega = -\frac{1}{T_m} \omega + \frac{1}{T_m c} u; \quad (23)$$

$$p \hat{\omega} = -\frac{1}{T} \hat{\omega} + \frac{K}{T} \omega \quad (24)$$

и ввиду малости порядка объекта управления рассмотрим упрощенную процедуру синтеза линеаризующего регулятора без использования матричного исчисления и дифференциальной геометрии.

Для определения нового управляющего воздействия v продифференцируем уравнение (24)

$$p^2 \hat{\omega} = -\frac{1}{T} p \hat{\omega} + \frac{K}{T} p \omega. \quad (25)$$

С учетом зависимостей (23) и (24) уравнение (25) преобразуем следующим образом

$$p^2 \hat{\omega} = -\frac{1}{T} p \hat{\omega} + \frac{K}{T} \left(-\frac{1}{T_m} \omega + \frac{U}{T_m c} \right) = -\frac{1}{T} p \hat{\omega} - \frac{K}{T_m T} \omega + \frac{K}{T_m T c} u. \quad (26)$$

Введем новое управляющее воздействие

$$p\hat{\omega} = v \quad , \quad p^2\hat{\omega} = pv \quad (27)$$

С учетом производных (27) уравнение (26) примет вид

$$pv = -\frac{1}{T}v - \frac{K}{T_m T}\omega + \frac{K}{T_m T_c}u. \quad (28)$$

Решив уравнение (28) относительно управляющего воздействия u , получим

$$u = \frac{T_m T_c}{K}pv + \frac{T_m c}{K}v + c\omega = c\omega + T_m c \frac{Tp+1}{K}v. \quad (29)$$

Анализ выражения (29) показывает наличие во втором слагаемом передаточной функции, обратной передаточной функции фильтра. Благодаря этому слагаемому в синтезированной системе осуществляется формирование

форсирующего воз-
действия, компен-
сирующего инер-
ционность филь-
тра.
Структурная схема
системы управления,
которая построена на
основании алго-
ритма (29), приве-
дена на рис. 1.

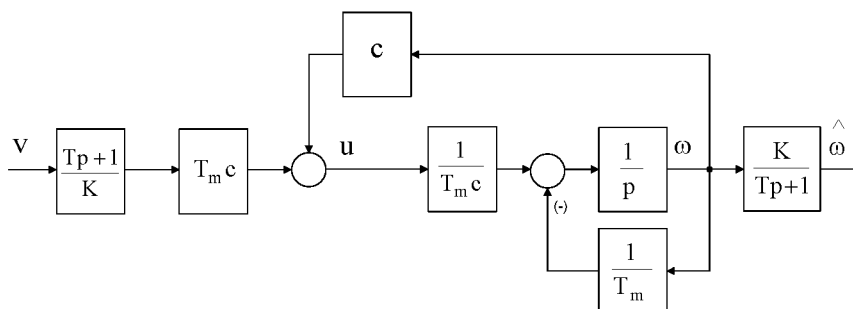


Рис. 1 – Структурная схема синтезированной системы управления

Обобщая результаты,

приведенные в рассматриваемом примере можно утверждать, что:

1. Синтезированный линеаризующий регулятор за счет положительной обратной связи по скорости компенсирует внутреннюю обратную двигателя;
2. Компенсация инерционности фильтра в канале обратной связи по скорости осуществляется дифференцированием задающего воздействия v ;
3. Синтезированный линеаризующий регулятор соответствует принципу симметрии систем автоматического управления;

Выводы. Приведенные в работе выкладки позволяют сделать вывод, что учет на этапе составления математического описания объекта управления неидеальностей каналов обратной связи позволяет повысить качество процессов управления электромеханическими объектами путем введения в алгоритм управления компенсирующих связей и составляющих.

Список литературы: 1. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы [Текст]/ Д. П. Ким. - М.: Физматлит, 2004.-464с. 2. Пупков К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Том 5. Методы современной теории автоматического управления [Текст]/ Н. Д. Егунов, К. А. Пупков. – М.: Бауманпресс, 2004.-748с. 3. Борисевич, А. В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB/ А. В. Борисевич - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. - 200 с. 4. Афанасьев, В. Н. Гарантированное управление нелинейными системами, линеаризуемыми обратной связью/В. Н. Афанасьев// Аналитическая механика, устойчивость и управление. Труды X Международной Четаевской конференции, Казань, 12-16 июня 2012 г.. Т. 3.3: Управление. Ч. 1. Издательство Казанского государственного технического университета, 2012. С. 156-168. 5. Сулов, В. Ф. Синтез астатических регуляторов многосвязных нелинейных объектов, линеаризуемых обратной связью [Текст]/ В.Ф. Сулов, М. С. Катков, О. В. Надеждин// Морской вестник. Спб.: МорВест, 2005.- №3(15). -С.53-55. 6. Piltan, F. Design Novel Fuzzy Robust Feedback Linearization

Control with Application to Robot Manipulator/*Farzin Piltan, Mohammad Hossain Yarmahmoudi, Mina Mirzaie, Sara Emamzadeh, Zahra Hivand*// International Journal of Intelligent Systems and Applications. - 2013.- Vol 5, Iss 5, P. 1-10. 7. *Belkacem, S.* Reduction of torque ripple in DTC for induction motor using input-output feedback linearization/ *Belkacem Sebti, Naceri Farid, Abdessemed Rachid*// Serbian Journal of Electrical Engineering.-2011.-Vol 8, Iss 2, Pp 97-110. 8. *Xiao-jing, S.* Design and Simulation of PMSM Feedback Linearization Control System/ *Song Xiao-jing*// TELKOMNIKA : Indonesian Journal of Electrical Engineering.-2013.- Vol 11, Iss 3, P. 1245-1250. 9. *Mchiri, M.* Observer Based Feedback Linearization Control of an Under-actuated Biped Robot/ *Mchiri Mohamed, Trabelsi Karim*//International Journal of Engineering Trends and Technology.-2013.- Vol 4, Iss 5, P.1899-1907. 10. *Sajedi, S.* A New Approach to Dynamic Control of Synchronous Generator in a Bulk Electric Power System by Direct Feedback Linearization/ *S. Sajedi, F. Khalifeh, T. Karimi, Z. Khalifeh*// Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. -2011.-Vol 3, Iss 11, P.1239-1245.

Bibliography (transliterated): 1. *Kim, D.* (2004) Theory of automated control. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems. Moscow: Fizmatlit, 464. 2. *Pupkov, K.* (2004) Methods of classical and modern automated control theory. Vol.5. Methods of modern automated control theory. Moscow: BaumanPress, 748 3. *Borisevich, A.* (2011) Theory of automated control: elementary introduction with MatLab using. Sankt-Peterburg: Polytechnical university Publ., 200 4. *Afanasiev, V.* (2012) Guaranteed control of nonlinear systems, linearizability feedback Analytical mechanics, stability and control. Proc. X International Chetaev's conference. Kazan, 12-16 June 2012 Vol. 3.3: Control. Part 1, 156-168. 5. *Suslov, V.* (2005) Synthesis astatic controllers of multiply nonlinear objects linearizable feedback. Morskoy vestnik, №3(15), 53-55. 6. *Piltan, F.* (2013) Design Novel Fuzzy Robust Feedback Linearization Control with Application to Robot Manipulator. Int. J. of Intelligent Systems and Applications, 5, 5, 1-10. 7. *Belkacem, S.* (2011) Reduction of torque ripple in DTC for induction motor using input-output feedback linearization. Serbian Journal of Electrical Engineering, 8, 2, 97-110. 8. *Xiao-jing, S.* (2013) Design and Simulation of PMSM Feedback Linearization Control System. TELKOMNIKA: Indonesian Journal of Electrical Engineering, 11, 3, 1245-1250. 9. *Mchiri, M.* (2013) Observer Based Feedback Linearization Control of an Under-actuated Biped Robot. Int. J. of Engineering Trends and Technology, 4, 5, 1899-1907. 10. *Sajedi, S.* A (2011) New Approach to Dynamic Control of Synchronous Generator in a Bulk Electric Power System by Direct Feedback Linearization Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 3, 11, 1239-1245

Надійшла (received) 17.12.2014

УДК 621.311.1.05

В. М. КУТІН, д-р техн. наук, проф., ВНТУ, Вінниця;

О. Є. РУБАНЕНКО, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця;

С. В. МИСЕНКО, інженер, ДП «НЕК «Укренерго» ВП «Південно-Західна ЕС», Вінниця

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Розглянуто існуючі методи та засоби для визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів. Обґрунтовано необхідність вдосконалення методів та засобів технічного діагностування високовольтних вимикачів для підвищення їх надійності в умовах експлуатації. Запропоновано комплексний метод діагностування високовольтних елегазових вимикачів, який враховує контроль струму тестового сигналу, як інтегрального показника при визначенні технічного стану його конструктивних елементів.

Ключові слова: комплексний метод, інтегральний показник, тестовий сигнал, діагностування, сенсор, резонанс

© В. М. КУТІН, О. Є. РУБАНЕНКО, С. В. МИСЕНКО, 2014

Вступ. Надійність роботи електроенергетичних систем в значній мірі залежить від надійності роботи такого відповідального обладнання розподільчих пристроїв, як високовольні вимикачі. Тому зрозумілим є прагнення експлуатуючих організацій замінити застарілі типи високовольних вимикачів, такі як повітряні та оливні, на нові – елегазові та вакуумні. Дослідження динаміки впровадження елегазових високовольних вимикачів, наприклад в Південно-Західній електроенергетичній системі (рис. 1.), свідчить про високі темпи їх впровадження. Введення в експлуатацію елегазових вимикачів різних типів та виробників потребує детального ознайомлення персоналу експлуатуючих організацій з технічної документацією, накопичення та аналіз досвіду експлуатацію власного, так і подібного до нього обладнання [1, 2].

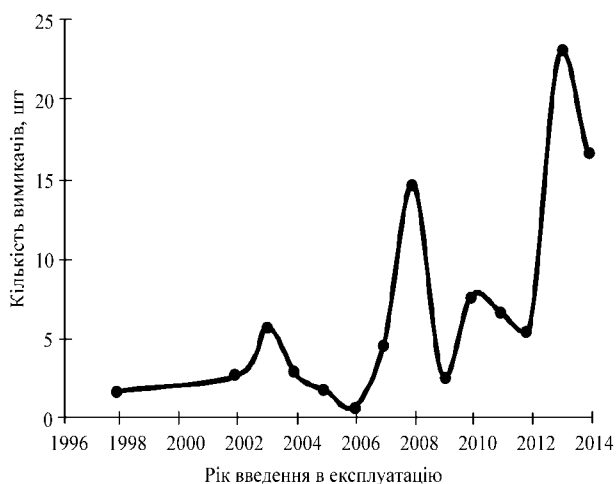


Рис. 1 – Динаміка заміни вимикачів напругою 110-750 кВ на елегазові на підстанціях Південно-Західної електроенергетичної системи

Досвід експлуатації елегазових вимикачів, в порівнянні з досвідом експлуатації повітряних та оливних набагато менший. Проте його аналіз свідчить про велику кількість різних типів та виробників елегазових вимикачів, що вимагає від проектних організацій ретельного підбору технічних характеристик вимикача та його виробника під час виконання проектних рішень на реконструкції розподільчих пристроїв. Аналіз результатів експлуатації свідчить про наступні відмови: пошкодження електромагнітів увімкнення та вимкнення; порушення кріплення ковзаючих контактів до дуттєвого циліндру, що призводить до зменшення ізоляційного проміжку між рухомим та нерухомим контактами вимикача; пошкодження двигуна заведення пружини увімкнення; обрив склопоксидної тяги в дугогасильній камері; втрата тиску дугогасного середовища; пошкодження дугогасильних камер вимикача на напругу 750 кВ, який встановлений в колі ректора, під час виконання неуспішного АПВ; дисбаланс між пружинами увімкнення та вимкнення, що призводить до нестабільної роботи приводного механізму, а саме вимикач при виконання операції увімкнення не завжди фіксується в увімкненому положенні і т. п. [3].

Під час експлуатації елегазових вимикачів заводи виробники у відповідності до керівництва з експлуатації, не вимагають проведення поточних ремонтів, а пропонують виконувати лише візуальний огляд з періодичністю один раз в рік та профілактичне технічне обслуговування через 12,5-15 років експлуатації, а капітальний ремонт потрібно проводити по вичерпанню паспортного або комутаційного ресурсу. В той же час виробники (ABB, Siemens та інші) активно розробляють і впроваджують сучасні мікропроцесорні системи онлайн-моніторингу технічного стану вимикача, з постійним розширенням їх

функціональних можливостей визначення технічних параметрів вимикачів в умовах експлуатації [4].

Під час проведення профілактичного технічного обслуговування визначення швидкісних характеристик на елегазових вимикачах інколи обмежено конструктивними особливостями виконання приводних механізмів, а саме відсутністю місць приєднання сенсорів кутового та лінійного переміщення до їх рухомих ланок [5].

Широке впровадження елегазових вимикачів та зростання їх кількості в експлуатуючих організаціях дозволили отримати статистику їх відмов, яка свідчить про необхідність вдосконалення методів і засобів визначення технічного стану, як під час експлуатації (системи онлайн-моніторингу) так і при оглядах. Вони мають бути універсальними, інформативними та дозволяти в короткий термін часу огляду вимикача (виконується один раз на рік), визначати технічний стан багатьох вузлів цих вимикачів.

Аналіз існуючих методів та засобів контролю елегазових вимикачів. Для визначення технічного стану вимикача використовуються різні методи і засоби, які дозволяють визначати значення різних діагностичних параметрів таких, наприклад, як параметри часових та швидкісних характеристик. На результати визначення параметрів часових та швидкісних характеристик вимикача, який встановлений на діючій підстанції, негативний вплив мають завади, що викликані умовами експлуатації (високою напругою, вологістю повітря, коронними розрядами, частковими розрядами в ізоляції, комутаційними перенапругами і т.п.). Такі завади зменшують якість діагностування та виявлення дефектів, особливо, на ранній стадії їх розвитку.

Прикладом, є негативний вплив завад на роботу пристроїв контролю швидкісних характеристик вимикача, які використовують тестовий сигнал змінної напруги заздалегідь вибраної однієї частоти [6].

Відомі пристрої, які вимагають: обов'язкового заземлення апаратних ввідів вимикача під час діагностування, що не завжди можливе під час планових оглядів [6]; під'єднання сенсорів кутового та лінійного переміщення, що неможливо для деяких конструкцій вимикачів [7]; заземлення апаратних виводів вимикача через котушки індуктивності, що негативно впливає на результати випробувань при використанні високочастотного сигналу [7]; використання високочастотного фільтру, який налаштований на умову резонансу з джерелом тестової напруги, у вигляді ємності, індуктивності та активного опору, які паралельно з'єднанні між собою, що обмежує подання оптимальної частоти для отримання інформативного сигналу в умовах змінної між контактної ємності [7].

Існують пристрої, які адаптовані лише до таких схем розподільних пристроїв, у яких вимикач з однієї сторони приєднаний до лінії, а з іншої до шин, що є нетиповим рішенням для схеми розподільних пристроїв на клас напруги 220 кВ і вище в енергосистемах України [8].

Потребують вдосконалення прилади контролю швидкісних характеристик вимикачів, експлуатованих у відкритих розподільних пристроях, які передбачають використання послідовного, або паралельного резонансу лише на одній частоті – частоті тестового сигналу, яка вибрана заздалегідь (при виготовленні приладу) за

умови максимальної амплітуди цього сигналу на виході сенсора і не змінюється під час експлуатації, якщо частота тестового сигналу співпадає з частотою завод [9].

Не врахування параметрів матеріалу, який використовується при виготовленні вимикача, наприклад елегазу (залежність від температури, тиску, вологи), обмежує можливості приладів діагностування та погіршує якість постановки діагнозу, наприклад впливає на результати визначення характеристик прискорення руху контактів, які визначаються з врахуванням зміни ємності між контактами [10].

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є підвищення якості діагностування елегазових вимикачів, експлуатованих в умовах впливу високих напруженостей електромагнітного поля електричних станцій та підстанцій, скорочення часу діагностування, забезпечення методичної та апаратної підтримки прийняття рішення персоналом про стан вимикача під час його планового огляду.

Тому задачами досліджень є: визначення інтегрального діагностичного параметра вимикача, який дозволяє у короткий термін огляду вимикача визначати, як стан вимикача так і стан найчастіше пошкоджуваних його вузлів; розробка математичної моделі струму тестового сигналу, використовуваного під час діагностування, яка дозволяє встановити залежності струму тестового сигналу від положення контактів вимикача з урахуванням якості елегазу та стану ізоляції апаратних ввідів; розробка комплексного методу діагностування елегазового вимикача, який дозволяє у короткий термін огляду вимикача визначати, як стан вимикача так і стан найчастіше пошкоджуваних його вузлів.

Інтегральний діагностичний параметр вимикача. Справний стан вимикача – це стан, при якому він відповідає всім вимогам нормативно-технічної або конструкторській документації [11, 12].

Стан вимикача позначимо лінгвістичною змінною S , яка в процесі експлуатації може набувати значення: 1 – при справному стані вимикача або 0 – при несправному стані. Математична модель стану вимикача (1)

$$S = \begin{cases} 1, \text{ якщо } I_{тест} < (I_{норм} \pm 3\%), n_{рпф} = 0 \text{ та } t = t_1 \\ 0, \text{ якщо } I_{тест} > (I_{норм} \pm 3\%), n_{рпф} = 0 \text{ та } t = t_1 \\ 1, \text{ якщо } I_{тест} < (I_{2норм} \pm 3\%), n_{рпф} = 0 \text{ та } t = t_2 \\ 0, \text{ якщо } I_{тест} > (I_{2норм} \pm 3\%), n_{рпф} = 0 \text{ та } t = t_2 \\ 1, \text{ якщо } I_{тест} < (I_{3норм} \pm 3\%), n_{рпф} = 0 \text{ та } t = t_3 \\ 0, \text{ якщо } I_{тест} > (I_{3норм} \pm 3\%), n_{рпф} = 0 \text{ та } t = t_3 \\ 1, \text{ якщо } I_{тест} < (I_{4норм} \pm 9\%), n_{рпф} = f_1 \text{ та } t = t_4 \\ 0, \text{ якщо } I_{тест} > (I_{4норм} \pm 9\%), n_{рпф} = f_1 \text{ та } t = t_4 \\ 1, \text{ якщо } I_{тест} > (I_{5норм} \pm 9\%), n_{рпф} = f_2 \text{ та } t = t_5 \\ 0, \text{ якщо } I_{тест} > (I_{5норм} \pm 9\%), n_{рпф} = f_2 \text{ та } t = t_5 \\ 1, \text{ якщо } I_{тест} > (I_{6норм} \pm 9\%), n_{рпф} = f_3 \text{ та } t = t_6 \\ 0, \text{ якщо } I_{тест} > (I_{6норм} \pm 9\%), n_{рпф} = f_3 \text{ та } t = t_6 \end{cases} \quad (1)$$

де $I_{тест}$ – інтегральний діагностичний параметр, струм джерела тестового гармонійного сигналу, який в процесі вимірювань може змінювати свої значення відповідно до часу вимірювань та частоти джерела тестового сигналу, що характеризує стан контрольованих вузлів вимикача, якому проводять діагностування, $I_{норм}$ – нормативне значення струму тестового сигналу при визначенні технічних характеристик вимикача в відповідні моменти часу, $t_1, t_2, t_3,$

t_4, t_5, t_6 – характерні моменти часу для визначення технічного стану конструктивних елементів вимикача, f_1, f_2, f_3 – частота джерела тестового сигналу, яка вибирається з урахуванням спектру частот завод та інформативності результату.

Струм джерела тестового гармонійного сигналу протікає в колі (рис. 2): джерело тестового сигналу, контакти вимикача, сенсор струму, контур заземлення, джерело тестового сигналу [13]. На рис. 1 показані: 1 – пристрій контролю технічного стану елегазових вимикачів, ДТС – джерело тестового сигналу, С – сенсор струму.

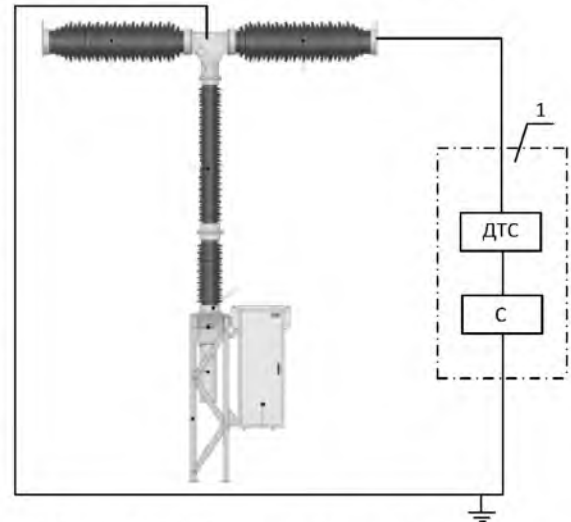


Рис. 2 – Схема діагностування елегазових вимикачів

Під час діагностування вимикача частота тестового сигналу змінюється від нуля до мегагерц таким чином, щоб створити резонанс струмів в кожний момент часу, коли здійснюється вимірювання.

Миттєве значення струму тестового сигналу у заздалегідь визначені моменти часу випробовувань, яким відповідає частота тестового сигналу, залежить від технічного стану вузлів вимикача. Отримане значення струму корегується з урахуванням температури та вологості повітря і густини або тиску елегазу.

Контроль тестового сигналу, у вигляді інтегрального показника – струму джерела тестового сигналу дає можливість визначати: опір ізоляції кожного полюса відносно заземлених частин вимикача та опір постійному струму головного струмоведучого контуру (на частоті нуль герц), час увімкнення, час вимкнення, різночасність увімкнення, різночасність вимкнення, час вібрації контактів, відхилення від нормальної роботи рухомих елементів приводного механізму таких як ланки, пружини увімкнення та вимкнення, спряжені частини приводного механізму, швидкості руху рухомої контактної системи (РКС), по яких на заздалегідь обґрунтованих інтервалах часу визначається технічний стан елементів елегазових вимикачів та його дугогасного середовища.

Математична модель струму тестового сигналу. Для побудови математичної моделі струму тестового сигналу, використовуваного під час діагностування, проведено аналіз конструктивних особливостей елегазових вимикачів та побудована схема заміщення (рис. 3).

На схемі (рис. 3) показані: e – електрорушійна сила джерела тестового сигналу (2), R_1 – активний опір сенсора, приєднаний послідовно до джерела тестового сигналу, $Z_2(t)$ – повний опір між контактами

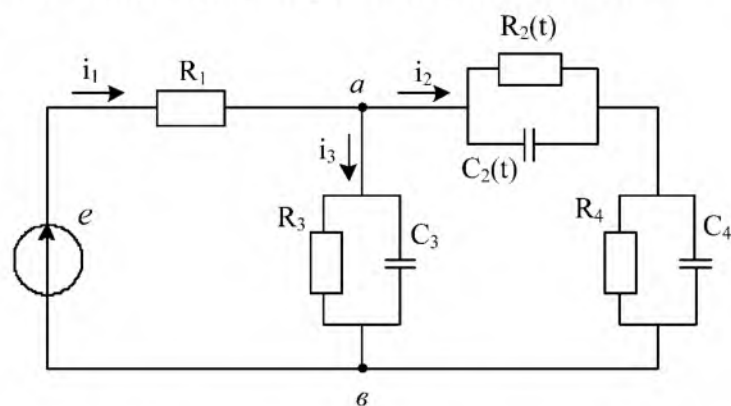


Рис. 3 – Схема заміщення дугогасильної камери елегазового вимикача

дугогасильної камери, який складається з ємнісного $X_2(t)$ (опір ємності $C_2(t)$, який змінює своє значення під час операції увімкнення або вимкнення) та активного $R_2(t)$ (опір ізоляції між контактами, який змінює своє значення під час операції увімкнення або вимкнення) опорів, Z_3 та Z_4 – повні опори рухомого та нерухомого контактів відносно заземлених частин вимикача, які складаються з ємнісних X_3, X_4 (опір ємностей C_3, C_4) та активних R_3, R_4 ; R_3, C_3 – опір та ємність ізоляції рухомого контактів відносно заземлених частин вимикача; R_4, C_4 – опір та ємність ізоляції нерухомого контакту відносно заземлених частин вимикача [14]:

$$e(t) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_e), \quad (2)$$

де ω – кутова швидкість, t – час, E_m – напруга джерела тестового сигналу.

$$\omega = 2\pi f, \quad (3)$$

де f – частота тестового сигналу.

На основі аналізу схеми заміщення (рис. 3) визначено комплексні опори в колі:

$$\underline{Z}_2(t) = \frac{R_2(t)}{1 + j\omega C_2(t)R_2(t)}, \quad (4)$$

$$\underline{Z}_3 = \frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3}, \quad (5)$$

$$\underline{Z}_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}. \quad (6)$$

Використовуючи правила паралельно-послідовного перетворення визначимо повний опір кола:

$$\underline{Z}_{\text{ВХ}}(t) = R_1 + \frac{\frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3} \cdot \left[\frac{R_2(t)}{1 + j\omega C_2(t)R_2(t)} + \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \right]}{\frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3} + \frac{R_2(t)}{1 + j\omega C_2(t)R_2(t)} + \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}}. \quad (7)$$

За законом Ома знайдено комплексні значення амплітуди струму $\underline{I}_{1m}(t)$ та миттєве $i_{1m}(t)$ значення струму тестового сигналу під час виконання операції вимкнення:

$$\underline{I}_{1m}(t) = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{\text{ВХ}}(t)} = \frac{\underline{E}}{R_1 + \frac{\frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3} \cdot \left[\frac{R_2(t)}{1 + j\omega C_2(t)R_2(t)} + \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \right]}{\frac{R_3}{1 + j\omega C_3 R_3} + \frac{R_2(t)}{1 + j\omega C_2(t)R_2(t)} + \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}}}, \quad (8)$$

$$i_{1m}(t) = |\underline{I}_{1m}(t)| \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(\underline{I}_{1m}(t))). \quad (9)$$

Залежності зміни ємності та активного опору, наприклад, під час виконання операції вимкнення вимикача було встановлено експериментально, шляхом поступового переміщення рухомої контактної системи від кінцевого положення увімкнено до кінцевого положення вимкнено [13]:

$$C_{2\text{ВИМК}}(t) = (75,576 \cdot e^{-0,201 \cdot t} + 10,624) \cdot 10^{-12}, \text{ Ф} \quad (10)$$

$$R_{2\text{ВИМК}}(t) = \left[\frac{0,358 + 1,58 \cdot t}{1 + 0,169 \cdot t - 0,0006 \cdot t^2} \right] \cdot 10^9, \text{ Ом} \quad (11)$$

Вираз (9) є математичною моделлю зміни тестового сигналу у вигляді залежності струму від часу. Контроль залежності зміни струму, під час виконання технологічних операцій, та порівняння його значень, з еталонними, на обґрунтовано визначених ділянках часу дає можливість досліджувати зміну технічного стану конструктивних елементів елегазових високовольтних вимикачів.

Відповідно до [15] відстань яку проходить РКС $h=f(v,t)$ під час виконання операції вимкнення вимикача умовно можна поділити на три частини (h_1, h_2, h_3), які відповідають трьом характерним інтервалам часу, та визначити за виразом (12)

$$h = \int_0^{t_1} v_1(t)dt + \int_{t_1}^{t_2} v_2(t)dt + \int_{t_2}^{t_3} v_3(t)dt = h_1 + h_2 + h_3, \quad (12)$$

де $v_1(t)$ – швидкість на початку руху РКС; $v_2(t)$ – швидкість руху контакту до вводу в дію оливного буфера; $v_3(t)$ – швидкість руху РКС після введення в роботу оливного буфера.

Тому для визначення технічного стану спряжених частин приводного механізму значення інтегрального показника необхідно порівнювати з еталонним значенням на проміжку часу від 0 до t_1 , для визначення пружних властивостей пружин увімкнення та вимкнення значення струму потрібно порівнювати на інтервалі часу від t_1 до t_2 , на якому швидкість руху РКС максимальна. Для встановлення технічного стану та часу введення в роботу амортизатора значення інтегрального показника потрібно порівнювати на інтервалі часу від t_2 до t_3 .

Результати досліджень на математичній моделі. Використовуючи програмне забезпечення *Mathcad* побудовано графік залежності зміни амплітудних миттєвих значень струму $i_1(t)$ тестового сигналу від часу під час операції вимкнення вимикача (рис. 4), при умові: $f=160$ кГц, $U_m=100$ В, $R_1=100$ Ом, $R_3=R_4=2000$ МОм, $C_3=C_4=196 \cdot 10^{-12}$ Ф.

Порівняння отриманої характеристики зі зразковою (отриманою для справного вимикача), попередньо знятою перед введенням вимикача в експлуатацію (нового або відремонтованого та визнаного справним вимикача), та аналізу відхилення цих характеристик на обґрунтовано визначених інтервалах часу, дозволяє одночасно виявити пошкодження в дугогасильній камері та приводному механізмі на ранній стадії розвитку. Наприклад, по максимальному значенню струму, якому відповідає значення ємності між контактами вимикача, яке знаходиться як перше значення після розмиканням контактів, робиться висновок про технічний стан дугогасного середовища. З використанням математичної моделі (8) побудовано графіки зміни струму тестового сигналу під вимикання вимикача для якісного (рис. 4) та зволоженого (рис. 5) елегазу.

Залежність струму тестового сигналу від часу (рис. 5) побудована для елегазу з вмістом вологи 2 % від загальної кількості елегазу в дугогасній камері.

Як видно з рис. 5 значення струму тестового сигналу, при збільшенні кількості вологи в дугогасному середовищі збільшується, що пояснюється збільшенням ємності між контактами вимикача.

Отже, комплексний показник – значення струму тестового сигналу різних частот, починаючи від нуля (а далі більше), в різні моменти часу комплексних випробувань елегазового вимикача, починаючи від тривало – розімкнутих,

тривало – замкнених до таких, які знаходяться у стані руху дозволяє визначати не лише часові характеристики вимикача та стан механічної частини в останню мить перед замиканням контактів, а і стан багатьох інших деталей та вузлів вимикача в короткий термін операцій з огляду вимикача, не вимагаючи додаткових змін конструкції.

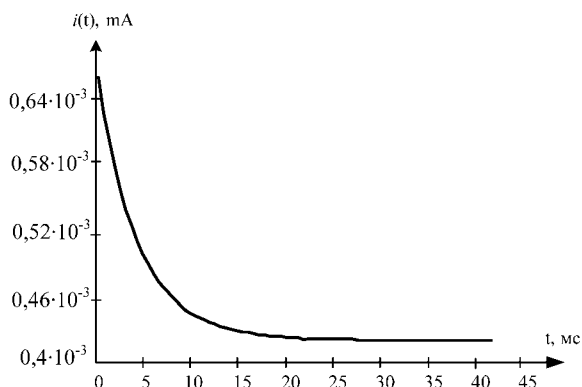


Рис. 4 – Залежність струму тестового сигналу від часу для якісного елегазу

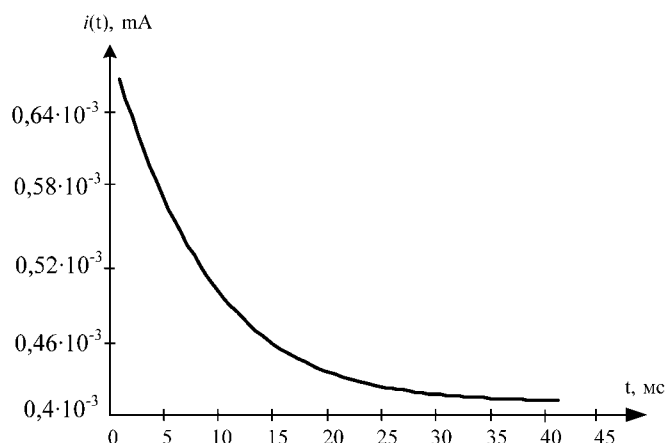


Рис. 5 – Залежність струму тестового сигналу від часу для зволоженого елегазу

Запропонований метод контролю ВВ, який вирішуючи задачу постановки діагнозу [12] – визначення причини погіршення технічного стану, знаходження пошкоджених, або потенційно ненадійних деталей (вузлів) в умовах короткочасних оглядів елегазових вимикачів, на відміну від відомих, які використовують тестовий сигнал фіксованої частоти (значно підсилений активними підсилювачами та завдяки використанню послідовного резонансу у вимірювальному колі), передбачає попереднє сканування напруг завад на виході сенсора по місцю випробувань, виявлення частот гармонійних складових цих напруг, виключення їх зі спектру частот тестових сигналів, використовуваних під час випробувань.

Комплексний метод та алгоритм випробувань елегазового вимикача. Комплексний метод діагностування реалізується з використанням принципової схеми діагностування елегазових вимикачів (рис. 6). На рис. 6. показані: 1 – вимикач, 2 – комутатор, 3 – пристрій контролю вимикачів. Запропоновано алгоритм проведення комплексного методу діагностування блок схема якого показана на рис. 7.

Комплексний метод передбачає чотири етапи діагностування. На першому етапі діагностування проводиться візуальний контроль.

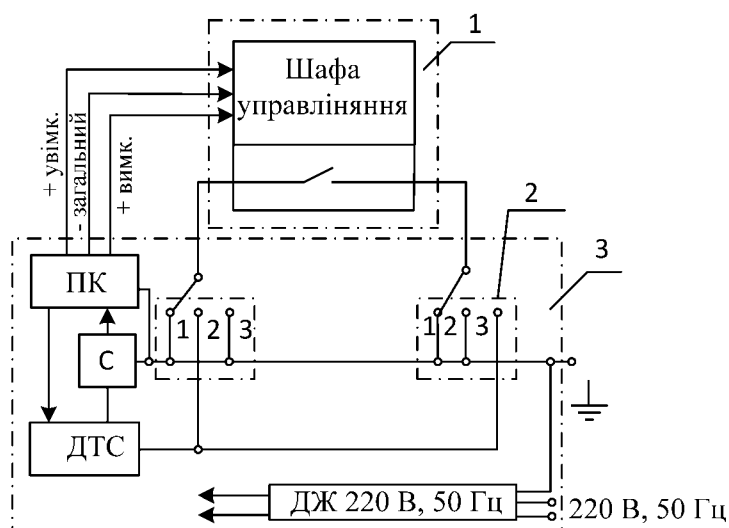


Рис. 6 – Принципова схема діагностування

На другому – складається схема діагностування (рис. 5). Джерело тестового сигналу подає в коло тестовий сигнал частотою нуль герц.

Шляхом визначення значення інтегрального показника та порівняння його з нормативним, визначається опір постійному струму головного струмоведучого контуру R_2 . Подається сигнал на електромагніт вимкнення. Визначається опір R_3 ізоляції першого апаратного вводу відносно заземлених частин вимикача (в кінцевому положення вимкнено приймається, що опір $R_2 = 2000$ МОм).

За рахунок перемикачів комутаторів заземлюється інший апаратний ввід та аналогічно визначається опір R_4 ізоляції другого апаратного вводу відносно заземлених частин вимикача. Нормативні значення інтегральних показників визначаються за умови максимально допустимого нормативного значення опору постійному струму головного струмоведучого контуру та опору ізоляції у відповідності до інструкції заводу виробника.

На третьому етапі проведення випробувань джерело тестового сигналу подає високочастотний сигнал, проводиться попереднє сканування напруг завод на виході сенсора по місцю випробувань, які викликані умовами діючої підстанції, виявлення частот гармонійних складових цих напруг, виключення їх зі

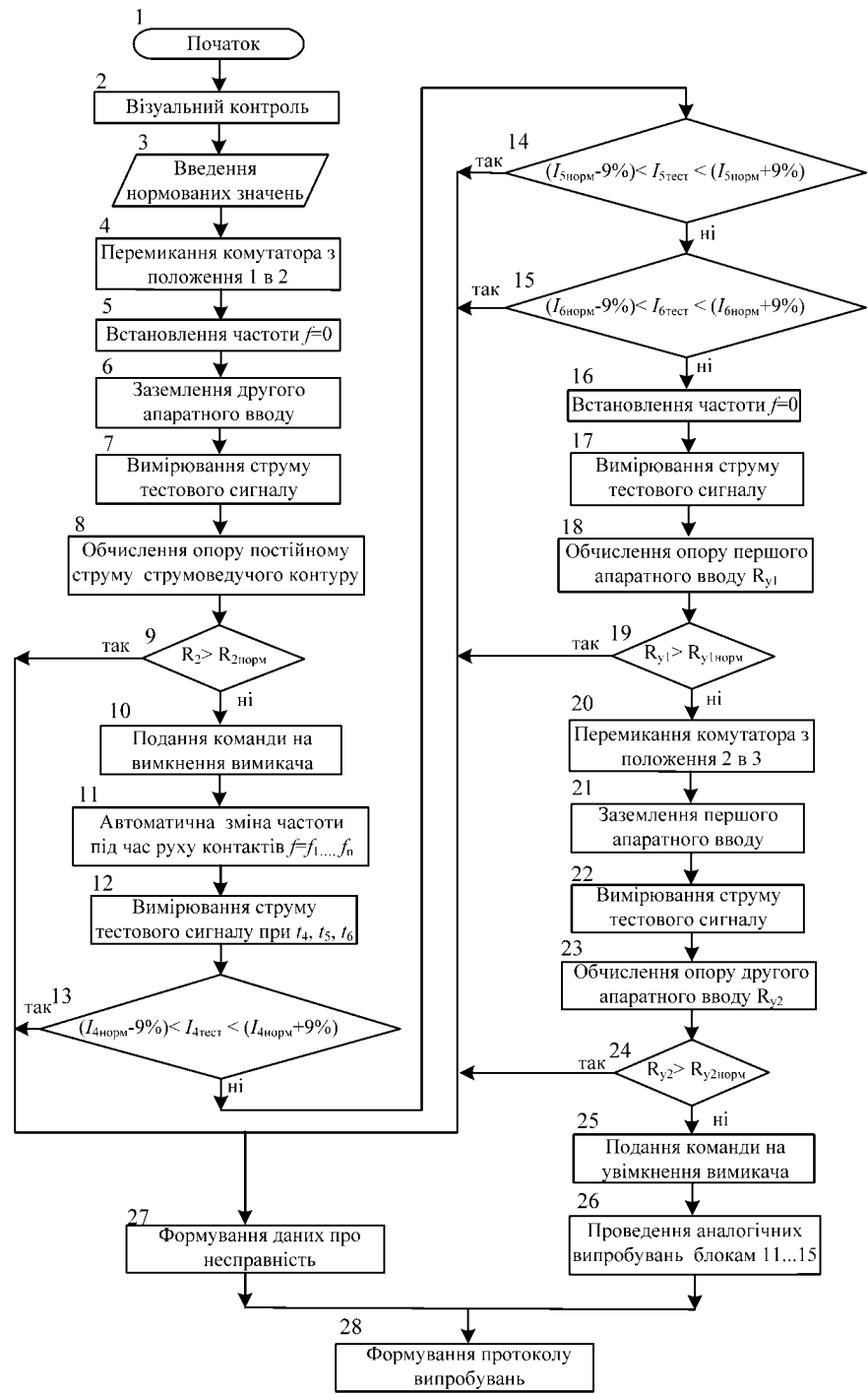


Рис. 7 – Алгоритм проведення комплексного методу діагностування

спектру частот тестових сигналів, використовуваних під час випробувань. Після подається високочастотний сигнал та проводиться неперервний його контроль під час виконання технологічних операцій вимикачем і порівняння отриманих

характеристик з еталонними, попередньо знятими перед вводом вимикача в експлуатацію або після ремонту, та аналізу відхилення цих характеристик на обґрунтовано визначених інтервалах часу, що дозволяє одночасно виявити пошкодження в дугогасильній камері та приводному механізмі на ранній стадії розвитку.

На четвертому етапі джерело тестового сигналу автоматично змінює частоту цього сигналу та подає його на контакти контрольованого вимикача.

Автоматично змінювана частота тестового сигналу, під час руху контактів вимикача, покликана забезпечити виконання умов резонансу між індуктивністю допоміжного трансформатора джерела тестового сигналу та між контактною ємністю вимикача, яка змінюється під час руху його контактів викликаного увімкненням або вимкненням вимикача. Контроль відхилення від умови резонансу, та встановлення на якому інтервалі часу це відбулося, дає можливість зробити попередній висновок про відхилення від нормальної роботи вузлів та деталей вимикача.

Висновки. Побудовано математичну модель струму тестового сигналу, яка дозволяє встановити технічний стан конструктивних елементів елегазового вимикача та дугогасного середовища. Контроль струму тестового сигналу, як інтегрального показника, та порівняння його значення з еталонними, отриманими під час проведення пуско-налагоджувальних робіт або ремонту, на обґрунтовано визначених ділянках дає можливість визначати зміну технічного стану його конструктивних елементів під час експлуатації. Контроль умови забезпечення резонансу на всьому інтервалі часу виконання технологічних операцій дає можливість визначати технічний стан конструктивних елементів елегазових високовольтних вимикачів, технічного стану дугогасильного середовища та його ізоляційних властивостей відносно заземлених частин. Розроблено та побудовано алгоритм проведення комплексного методу діагностування елегазових вимикачів, який дозволяє підвищити якість діагностування та скоротити його час, шляхом накладання на контакти камер тестового сигналу різних частот.

Список літератури: 1. *Идельчик, В. И.* «Электрические системы и сети» [Текст] / *Виталий Исаакович Идельчик.* – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с. 2. *Михайлюк, Р. І.* «Досвід та перспективи експлуатації елегазових вимикачів у Південно-Західній енергетичній системі [Текст] / *Р. І. Михайлюк, С. В. Мисенко, В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко* // Енергетика та електрифікація. – 2014. – №3. – С. 34–37. 3. *Тимашова, Л. В.* Аналіз повреждаемости выключателей 110–750 кВ [Електронний ресурс] / *Л. В. Тимашова, И. Л. Шлейфман, И. А. Назаров* // Материалы V международной научно-технической конференции «Высоковольтное коммутационное оборудование». Москва. – 2009. – 8 с. 4. Руководство по эксплуатации. LTV 245-420 (T) E2. Приводной механизм BLG 1002A однополюсный. 1HSB439954-4ru.- 2011-11-30. 5. *Гобрей, Р. М.* Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагодження і в експлуатації. Довідниково-методичний посібник. Частина 2. Загальні методи та засоби діагностування, випробувань та вимірювань електрообладнання, виведеного з роботи [Текст] / *Р. М. Гобрей, Г. В. Шинкаренко, О. М. Болдирев, Г. М. Коліушко, Д. Г. Коліушко* // – К.: «ДП НТУКЦ». – 2011. – 1008 с. 6. *Maricel Adam.* Monitoring and diagnostic system for high voltage circuit breakers [Текст] / *Maricel Adam, Adrian Baraboi, Catalin Pancu* // International conference on electromechanical and power systems. Moldova. October 4–6, 2007. 7.

Патент №US 6,963,203 B2. Methods and apparatus for analyzing high voltage circuit breakers [Текст] / *Zoran Stanisic, Heinz Wernh.* – №US 10/764,243; Заявл. 23.01.2004; Оpubл. 8.11.2005. **8.** Factor controlling surface flashover in SF₆ gas insulated systems [Текст] / *T. Nitta, Y. Shibuya, Y. Fujiwara* // IEEE Trans, on power apparat and syst. – 1978. – Vol. PAS–97. №3.– P. 959–965. **9.** Reliability and electrical stress survey on high voltage circuit breaker in Japan / *Y. Nakada, J. Kida, I. Takagi* etc. // CIGRE. 2006. Pap. A3-205. **10.** *Кукеров, Г. А.* Выключатели переменного тока высокого напряжения [Текст] / *Г. А. Кукеров.* // – Л.: Энергия, 1972. –336 с. **11.** ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. **12.** Норми випробовувань електрообладнання [Текст]: СОУ–Н ЕЕ 20.302:2007. – Видання офіційне. – К.: ГРІФРЕ, 2007. – 262 с. (Нормативний документ мінпаливенергоУкраїни.). **13.** *Кутин, В. М.* Вдосконалення методів діагностування високовольтних вимикачів [Текст] / *В. М. Кутин, О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко* // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №1. – С.109–113. **14.** *Кутин, В. М.* Визначення діагностичних параметрів оцінки технічного стану високовольтного вимикача [Текст] / *Кутин В. М., Рубаненко О.Є., Мисенко С. В.* // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – №3. – С. 33-39. ISSN 1813-5420. **15.** *Зелінський, В. Ц.* Фізичні основи електричних апаратів: Навчальний посібник [Текст] / *В. Ц. Зелінський*//– Вінниця: ВДТУ, 2001. – 134 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Idel'chik, V. I.* (1989). «Elektricheskie sistemy i seti».- Moscow, *Energoatomizdat*, 592. **2.** *Mihajlyuk, R. I., Misenko, S. V., Kutin, V. M., Rubanenko, O. E.* (2014). Dosvid ta perspektivi ekspluatatsii elegazovih vimikachiv u Pivdenno-Zahidnij energetichnij sistemi. *Energetika ta elektrifikaciya*, 3, 34-37. **3.** *Timashova, L. V., Shlejfman, I. L., Nazarov, I. A.* (2009). Analiz povrezhdaemosti vyklyuchatelej 110–750 kV. Materialy V mezhdunarodnoj nauchno–tehnicheskaya konferencii «Vysokovol'tnoe kommutacionnoe oborudovanie». Moskva. **4.** Rukovodstvo po ehkspluatatsii. LTB 245-420 (T) E2. Privodnoj mekhanizm BLG 1002A odnopolyusnyi. IHSB439954-4ru.- 2011-11-30. **5.** *Gobrej, R. M., Shinkarenko, G. V., Boldirev, O. M., Koliushko, G. M., Koliushko, D. G.* (2011). Tekhnichne diagnostuvannya, viprobuvannya ta vimiryuvannya elektroobladnannya v umovah montazhu, nalagodzhennya i v ekspluatatsii. Dovidnikovo – metodichnij posibnik. Chastina 2. Zagal'ni metodi ta zasobi diagnostuvannya, viprobuvan' ta vimiryuvan' elektroobladnannya, vivedenogo z roboti. - Kiev: «DP NTUKC», 1008. **6.** *Maricel, A., Baraboi, A., Catalin, P.* (2007). Monitoring and diagnostic system for high voltage circuit breakers. International conference on electromechanical and power systems. Moldova. **7.** Patent №US 6,963,203 B2. Methods and apparatus for analyzing high voltage circuit breakers./– *Zoran Stanisic, Heinz Wernh.* – №US 10/764,243; Zayavl. 23.01.2004; Opubl. 8.11.2005. **8.** *Nitta, T., Shibuya, Y., Fujiwara, Y.* (1978). Factor controlling surface flashover in SF₆ gas insulated systems. IEEE Trans, on power apparat and syst., V, PAS–97., 3, 959-965. **9.** *Nakada, Y., Kida, J., Takagi I.* (2006). Reliability and electrical stress survey on high voltage circuit breaker in Japan. CIGRE., 203-205. **10.** *Kukerov, G. A.* (1972). Vyklyuchateli peremennogo toka vysokogo napryazheniya, Energiya, 336. **11.** GOST 27.002-89. (1990). Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya. - Moscow: Izd-vo standartov. **12.** Normi viprobuvuvan elektroobladnannya: SOU–N ЕЕ 20.302:2007. – Vidannya oficijne, K., GRIFRE, 262. **13.** *Kutin, V. M., Rubanenko, O. E., Misenko, S. V.* (2012) Vdoskonalennya metodiv diagnostuvannya visokovol'tnih vimikachiv, *Visnik Vinnic'kogo politekhnichnogo institutu*, 1, 109-113. **14.** *Kutin, V. M., Rubanenko, O. E., Misenko, S. V.* (2014). Vznachennya diagnostichnih parametriv ocinki tekhnichnogo stanu visokovol'tnogo vimikacha, *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, 3, 33-39. **15.** *Zelins'kij, V. C.* (2001). Fizichni osnovi elektrichnih aparativ, *Navchal'nij posibnik*, Vinnicya, VDTU, 134.

Надійшла (received) 17.12.2014

П. Д. ЛЕЖНЮК, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ВНТУ, Вінниця;
О. Є. РУБАНЕНКО, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця;
Ю. В. МАЛОГУЛКО, асистент ВНТУ, Вінниця

ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Розроблено математичну модель оптимального розподілу активного та реактивного навантаження електричних мереж між відновлювальними джерелами електроенергії. Отримано метод формування перспективного плану розвитку електричних мереж з поетапним визначенням оптимальних місць приєднання відновлюваних джерел електроенергії. Запропоновано використання узагальнених показників ефективності проектних рішень схеми видачі електроенергії РДЕ у ЛЕС.

Ключові слова: розподілені джерела електроенергії, локальні електричні системи, коефіцієнт чутливості втрат потужності.

Вступ. Недослідженість питань проектування та експлуатації розподілених джерел електричної енергії (РДЕ) в сучасних умовах, їх впливу на режими роботи електричних мереж, неузгодженість номінальних параметрів основного обладнання з потребами таких джерел, відсутність типових рішень стосовно засобів захисту та автоматизації процесу виробництва електроенергії не дозволяє приймати обґрунтовані проектні рішення під час їх розбудови, крім того не дозволяє ефективно їх експлуатувати. Тому, актуальним є розвиток методичного, інформаційного і технічного забезпечення їх експлуатації. Важливим в цьому напрямку є комплексність і методологічна єдність в прийнятті рішень щодо покращення експлуатаційних характеристик РДЕ при роботі їх в електричних мережах.

В інженерній практиці різних країн розв'язується ряд задач оптимізації розподільних електричних мереж з РДЕ. Їх можна поділити на такі, що розв'язуються на етапах проектування та експлуатації. Такі задачі оптимізації, як автономна робота РДЕ, розташування комутаційного обладнання та формування комунікаційної мережі тісно взаємопов'язані та практично не можуть бути розв'язані в сучасних умовах. Автономна робота РДЕ, зважаючи на умовну-керованість та нестабільність цих джерел енергії, є фактично не можливою без розвиненої комунікаційної мережі. Наявність останньої дозволить отримувати двосторонній зв'язок між РДЕ та споживачами електроенергії, відповідно до концепції Smart Grid [1], та регулювати режими електроспоживання підтримуючи умови автономної роботи.

Зазвичай вказані задачі розв'язуються шляхом декомпозиції на задачі оптимізації функціонування РДЕ та задачі функціонування електричних мереж (ЕМ). В залежності від поставлених задач кожному із них розв'язують використовуючи один із критеріїв оптимальності, таких як: мінімум втрат електроенергії [2], якість електроенергії [3], надійність електропостачання [4], пропускна спроможність [5], швидкість відновлення напруги [6], максимум видачі потужності [7], максимум прибутку [8], мінімум інвестицій [9] тощо.

Мета роботи. Метою досліджень є розробка методів визначення, оптимальних за втратами активної потужності, місць та схем приєднання РДЕ до ЛЕС.

Аналіз існуючих моделей оптимізації розосереджених джерел енергії. Відомо декілька моделей оптимізації РДЕ, наприклад такі, як: модель оптимального розподіленого генерування з метою зменшення інвестиційної вартості РДЕ та зменшення втрат потужності; модель оптимального місця встановлення РДЕ з метою підвищення надійності ЛЕС; модель оптимального місця встановлення РДЕ з метою покращення якості електричної енергії [2-9].

Загальна вартість РДЕ складається не лише з інвестицій на обладнання РДЕ та витрат на їх будівництво, а також і з решти об'єму інвестицій з відстроченими витратами на будівництво в мережі. Відповідно, в результаті об'єктивна функція інвестиційної вартості РДЕ матиме наступний вигляд [9]:

$$\min F_{invest} = \min \sum_{j=1}^{N_{ВДЕ}} (1-\beta) \cdot C_j \cdot P_{jВДЕ}, \quad (1)$$

де $N_{ВДЕ}$ – загальна кількість вузлів, в яких може бути встановлене РДЕ; β – коефіцієнт відкладеного платежу інвестицій у будівництво РДЕ; C_j – вартість обладнання та вартість його встановлення у вузлі j , грн/кВт; $P_{jВДЕ}$ – номінальна потужність РДЕ, встановленого у вузлі j .

Багатопараметричність цільових функції у кожній з цих моделей, наприклад, в такій, як модель оптимального розподіленого генерування з метою зменшення інвестиційної вартості РДЕ (1) значно ускладнює пошук оптимального рішення.

Відомі методи оптимізації РДЕ в ЛЕС такі, наприклад, як метод евристичного перебору варіантів рішень, метод комплексного підходу, який поєднує метод перебору з використанням набору правил; метод під мереж; метод генетичного алгоритму; метод мурашиного алгоритму та інші. Всі ці методи мають загальний недолік лише місцевого застосування та неврахування чутливості впливу РДЕ на параметри режиму ЛЕС.

Важливим в досягненні ефективного використання РДЕ є правильний вибір місця їх під'єднання в електричній мережі. Оптимізація схем приєднання розосереджених джерел електроенергії до електричної мережі зі співмірною сукупною потужністю навантаження і генерування повинна здійснюватися за результатами аналізу чутливості впливу РДЕ на параметри режиму РЕМ.

Метод визначення оптимального місця приєднання розосереджених джерел енергії. Для розв'язання зазначених проблем у [10, 11] обґрунтовано можливість розв'язання задачі визначення впливу окремих вузлів генерації на втрати в ЕМ. Значення повної потужності на початку і в кінці кожної вітки схеми визначається за формулою [10, 11]:

$$\dot{S}_B = \sqrt{3} \dot{U}_d M_\Sigma \hat{I}_d, \quad (2)$$

де \dot{U}_d – діагональна матриця напруг у вузлах включаючи і базисний; M_Σ – матриця з'єднань віток у вузлах включаючи і балансуєчий; \hat{I}_d – діагональна матриця комплексно-спряжених струмів у вітках схеми (тут і далі знак $\hat{}$ означає, що матриця або вектор є комплексно-спряженим). Струм \hat{I}_i в i -й вітці може бути визначений через струми у вузлах за виразом

$$\hat{I}_i = \hat{C}_i \hat{J}, \quad (3)$$

де \hat{C}_i – i -й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах \hat{J} по вітках схеми.

Транспонований вектор втрат потужності у вітках схеми:

$$\Delta \dot{S}_{Bt} = \sqrt{3} \mathbf{n}_t \dot{U}_d \mathbf{M}_{\Sigma} \hat{I}_d,$$

або з врахуванням того, що $\mathbf{n}_t \dot{U}_d = \dot{U}_t$,

$$\Delta \dot{S}_{Bt} = \sqrt{3} \dot{U}_t \mathbf{M}_{\Sigma} \hat{I}_d, \quad (4)$$

де \dot{U}_t – транспонований вектор напруг у вузлах включаючи і базисний; \mathbf{n}_t – транспонований одиничний вектор стовпець, який має розмірність по кількості вузлів у схемі.

Втрати в i -й вітці схеми визначаються як

$$\Delta \dot{S}_{Bi} = \sqrt{3} (\dot{U}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{I}_i, \quad (5)$$

де $\mathbf{M}_{\Sigma i}$ – i -ий вектор-стовпець матриці інциденцій;

$$\Delta \dot{S}_{Bi} = \sqrt{3} (\dot{U}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{C}_i \hat{J}. \quad (6)$$

З урахуванням того, що

$$\hat{J} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_d^{-1} \dot{S},$$

$$\Delta \dot{S}_{Bi} = (\dot{U}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{C}_i \dot{U}_d^{-1} \dot{S}. \quad (7)$$

$$\dot{T}_i = (\dot{U}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{C}_i \dot{U}_d^{-1}. \quad (8)$$

Вектор-рядок \dot{T}_i складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах в i -й вітці складає протікання потужності по ній від кожного вузла [11].

Отже

$$\Delta \dot{S}_B = \dot{T} \cdot \dot{S}, \quad (9)$$

де $\Delta \dot{S}_B$ – вектор втрат потужності у вітках схеми; \dot{T} – матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках заступної схеми розподільної ЕМ в залежності від потужності у її вузлах схеми.

Згідно [11] зауважимо, що коефіцієнти розподілу втрат залежать від параметрів заступної схеми, які за певних допущень можна вважати постійними, а також від значень напруги у вузлах ЕМ, які визначаються навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Таким чином нелінійність залежності втрат потужності в ЕМ від параметрів її режиму враховується. Визначення коефіцієнтів матриці \dot{T} через поточні значення вузлових напруг по суті означає лінеаризацію режиму електричної мережі при зафіксованих потужностях у вузлах.

Для визначення оптимального місця приєднання РДЕ в ЛЕС за критерієм мінімуму втрат потужності з використанням матриці \dot{T} , необхідно на початковому етапі сформулювати перелік вузлів θ_B до яких можливе приєднання РДЕ. З переліку вузлів θ_B обирається такий, якому відповідає найменше значення вектора коефіцієнтів впливу потужностей вузлів на втрати активної потужності у ЛЕС:

$$\dot{T}_{\Sigma} = \dot{T} \cdot \mathbf{n}_B \quad (10)$$

де \mathbf{n}_b - одиничний вектор стовпець, який має розмірність по кількості вузлів у схемі.

Введення нових потужностей у обраний вузол забезпечить, з певним допущенням, мінімальний приріст втрат потужності.

Вектор $\dot{\mathbf{T}}_\Sigma$ має розмірність за кількістю вузлів. Кожен його елемент відповідає частці втрат потужності від потужності РДЕ, відповідно до номеру стовпця даного елемента.

Локальна електрична система постійно знаходиться під дією зовнішніх збурень викликаних центром живлення і внутрішніх збурень, викликаних зміною режимів роботи РДЕ. Зміни можуть виникати в ЛЕС в одній або декількох точках одночасно. В залежності від їх сили (значення) наслідки можуть характеризуватися кількісними змінами параметрів режиму в межах допустимих їх змін або якісними змінами режиму, наприклад, втратою стійкості. За післядією це дві різні задачі і розв'язуються вони різними методами [12, 13].

Складність утримання або введення режиму ЛЕС в допустиму область полягає в тому, що реакція параметрів режиму у різних її вузлах і вітках на збурення суттєво відрізняється. Відповідно вимагається різна дія окремих регулюючих пристроїв (джерел активної і реактивної потужностей, трансформаторів з поздовжньо-поперечним регулюванням, лінійних регуляторів тощо) на параметри режиму елементів і підсистем ЛЕС.

Якщо допустити, що коефіцієнти розподілу втрат потужності у вітках є незмінними, то при зміні потужності генерованої РДЕ втрати потужності в ЛЕС також зміняться:

$$\delta\Delta\dot{S}_\Sigma^{ЛЕС} = \dot{\mathbf{T}}_\Sigma \delta\dot{S}^{ВДЕ}, \quad (11)$$

де $\delta\dot{S}^{ВДЕ} = \dot{S}_{(k)}^{ВДЕ} - \dot{S}_{(k+1)}^{ВДЕ}$ – вектор-стовпець зміни потужностей у вузлах з РДЕ при переході з k -го режиму до $k+1$ -го.

Якщо зміна генерованої потужності відбулась тільки в одному РДЕ – j -му, то приріст втрат потужності в ЛЕС від зміни потужності в j -му вузлі на $\delta\dot{S}_j^{ВДЕ}$ буде складати:

$$\delta\Delta\dot{S}_j^{ЛЕС} = \dot{T}_{\Sigma j} \delta\dot{S}_j^{ВДЕ}. \quad (12)$$

$$\dot{T}_{\Sigma j} = \frac{\delta\Delta\dot{S}_j^{ЛЕС}}{\delta\dot{S}_j^{ВДЕ}}. \quad (13)$$

$\dot{T}_{\Sigma j}$ є коефіцієнтом чутливості втрат потужності в ЛЕС до зміни потужності в j -му вузлі РДЕ. Оскільки матриця $\dot{\mathbf{T}}_\Sigma$ складається з елементів виду $\dot{T}_{\Sigma j}$, то вона є матрицею чутливості, яка встановлює зв'язок між приростом втрат потужності у ЛЕС і змінами потужності у вузлах РДЕ.

На практиці в ЛЕС виникають задачі, коли у вузлах з РДЕ змінюються тільки активна або реактивна потужності. Якщо у вузлі змінюється тільки активна потужність ($\delta Q_j^{ВДЕ} = 0$, $\delta P_j^{ВДЕ} \neq 0$), то

$$\dot{T}_{\Sigma j} = \frac{\delta\Delta P_j^{ЛЕС}}{\delta P_j^{ВДЕ}} + j \frac{\delta\Delta Q_j^{ЛЕС}}{\delta P_j^{ВДЕ}}. \quad (14)$$

Навпаки, якщо у вузлі змінюється тільки реактивна потужність (вмикається або вимикається джерело реактивної потужності, $\delta Q_j^{BDE} \neq 0$, $\delta P_j^{BDE} = 0$), то

$$\dot{T}_{\Sigma j} = \frac{\delta \Delta Q_j^{JEC}}{\delta Q_j^{BDE}} - j \frac{\delta \Delta P_j^{JEC}}{\delta Q_j^{BDE}}. \quad (15)$$

Втрати активної потужності в ЛЕС при зміні режиму у вузлах визначаються як

$$\delta \Delta P_p^{JEC} = \mathbf{T}'_{\Sigma} \delta \mathbf{P}^{BDE}; \quad \delta \Delta P_Q^{JEC} = \mathbf{T}''_{\Sigma} \delta \mathbf{Q}^{BDE}, \quad (16)$$

де $\delta \mathbf{P}^{BDE}$ і $\delta \mathbf{Q}^{BDE}$ – вектор-стовпці змін відповідно активної і реактивної потужностей РДЕ у вузлах ЛЕС.

Оскільки запропоновані показники \mathbf{T}'_{Σ} , \mathbf{T}''_{Σ} є багатомірними, то без додаткових умов не дають можливості однозначного оцінювання ефективності проектних рішень.

У відповідності з фізичним змістом вектори \mathbf{T}'_{Σ} , \mathbf{T}''_{Σ} можна розглядати як функціональні метричні множини $\{\mathbf{T}'_{\Sigma}\}$, $\{\mathbf{T}''_{\Sigma}\}$, які задовольняють аксіомам метричного простору [14]. Кожна множина є набором координат n -вимірного вектора сумарних втрат потужності у базисі вузлових потужностей ЕМ, які визначені для відповідного варіанту розвитку. Таким чином, довжини векторів втрат dP' , dP'' у відповідності з [14] можуть бути визначені за виразами:

$$dP' = |\mathbf{T}'_{\Sigma}| = \left[\sqrt{\sum_{j=1}^n T_{\Sigma j}'^2} \right]; \quad dP'' = |\mathbf{T}''_{\Sigma}| = \left[\sqrt{\sum_{j=1}^n T_{\Sigma j}''^2} \right]. \quad (17)$$

Таким чином, довжини векторів dP' , dP'' мають фізичний зміст модулів відносних складових втрат ΔP від перетікань активної та реактивної потужностей і можуть бути використані як якісний індикатор впливу параметрів окремого вузла на рівень оптимальності режиму електричної мережі в цілому.

Алгоритм оптимізації місць розташування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах. Якщо визначити коефіцієнти впливу потужностей вузлів на втрати активної потужності в ЛЕС з РДЕ, то це дає можливість вибрати такі вузли ЛЕС, розташування РДЕ в яких, дозволить отримати мінімальні втрати активної потужності у вітках ЛЕС за умови забезпечення електричною потужністю споживачів ЛЕС. За умови використання автоматизованих систем керування РДЕ у відповідності до вимог концепції Smart Grid у програмному забезпеченні таких систем пропонуємо використовувати алгоритм визначення коефіцієнтів впливу потужностей вузлів на втрати активної потужності в ЛЕС з РДЕ (рис. 1).

Визначенню втрат потужності в заданих вітках електричної мережі передують введення початкових даних та формування заданого списку віток Θ_v та вузлів Θ_y , втрати від протікання потужностей навантажень яких необхідно визначити. Після розрахунку усталеного режиму в алгоритмі передбачено формування першої матриці з'єднань для всіх вузлів схеми, з врахуванням коефіцієнтів трансформації та масивів вузлових напруг і т. п. [10].

Після визначення матриці струморозподілу формується фрагмент матриці вузлових провідностей, що відповідає балансуєчим вузлам, шляхом видалення

відповідних рядків із повної матриці вузлових провідностей.

Враховуючи, що реальні схеми ЕЕС можуть мати незбалансовані коефіцієнти трансформації передбачено формування матриці $\dot{\mathbf{D}}_6$, яка має фізичний зміст провідностей, що визначають зрівнювальні струми від незбалансованих коефіцієнтів трансформації у замкнених контурах ЕЕС [10].

Далі, у відповідності з алгоритмом формуються матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності $\dot{\mathbf{T}}_k$ у вітках від потужностей у її вузлах з врахуванням коефіцієнтів трансформації та вектор втрат потужності $\Delta \dot{\mathbf{S}}_{н6}$ у вітках заступної схеми, викликаних незбалансованими коефіцієнтами трансформації.

Для оцінювання ефективності варіантів під'єднання нових потужностей генерування з використанням матриці $\dot{\mathbf{T}}$ за критерієм мінімуму втрат активної потужності формується перелік вузлів θ_v до яких можливе приєднання РДЕ.

З переліку вузлів θ_v обирається такий, якому відповідає найменше значення коефіцієнта впливу потужностей вузлів на втрати активної потужності у ЕМ визначений за виразом (9).

На виході з алгоритму передбачається визначення втрат потужності відповідно до заданого списку віток θ_v та вузлів θ_y та виведення результатів для відображення.

Наведений алгоритм призначено для визначення оптимальних місць розташування РДЕ та їх оптимальну встановлену потужність у локальній електричній системі з урахуванням позитивного ефекту від сумісного з основним

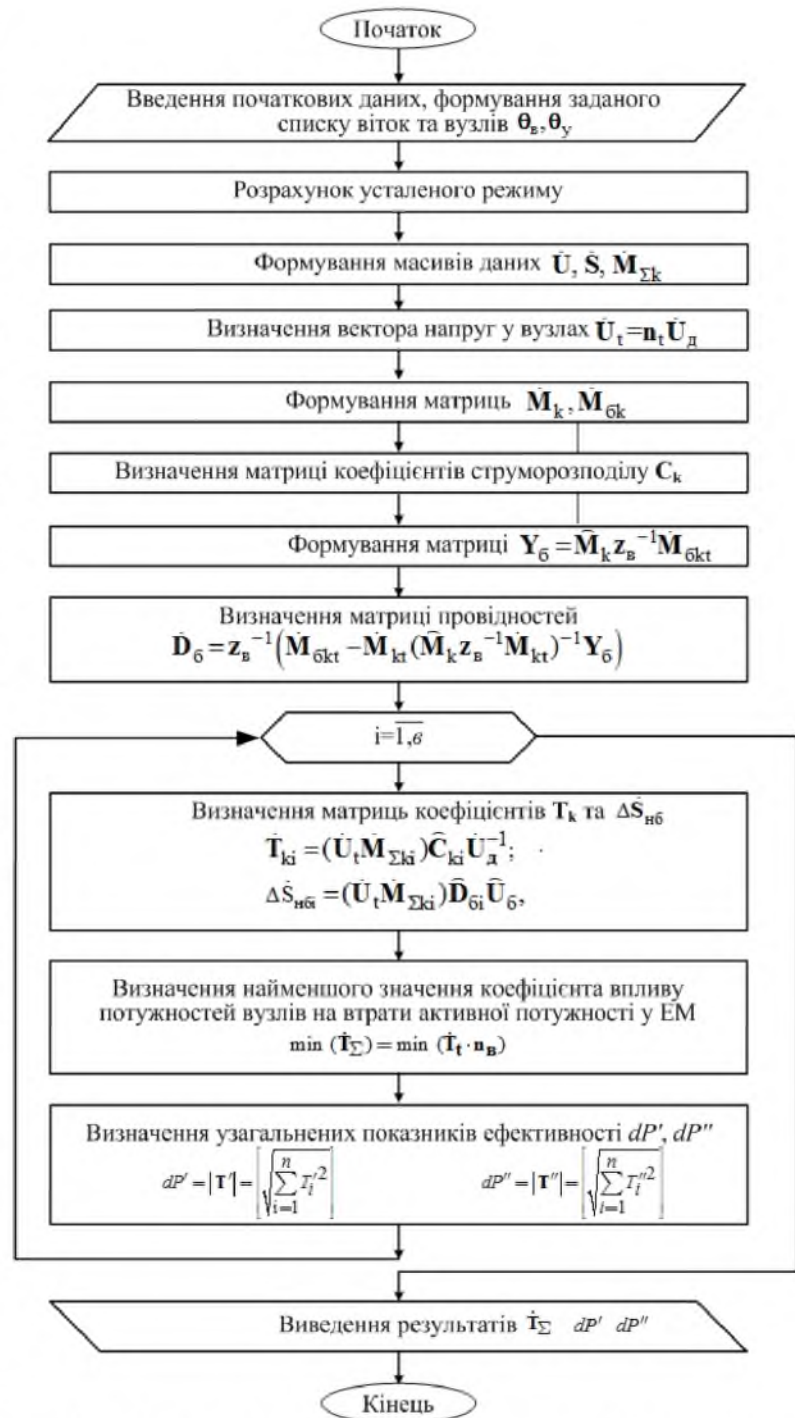


Рис. 1 – Алгоритм визначення коефіцієнтів впливу потужностей вузлів на втрати активної потужності в ЛЕС з РДЕ

центром живлення покриття навантажень споживачів ЕМ. Представлення коефіцієнтів трансформації у явному вигляді дозволяє виконувати оцінку ефективності керувальних впливів на рівень втрат як у енергосистемі загалом, так і у її окремих електричних мережах.

Розрахунки з визначення оптимального місця приєднання розосереджених джерел енергії. З метою перевірки пропонованих узагальнених показників ефективності проектних рішень щодо формування схеми видачі електроенергії РДЕ в ЛЕС виконано практичні розрахунки на прикладі електричних мереж 10 кВ Ямпільського району та Слобода-Бушанського енергетичного комплексу (рис. 2), які підтверджують адекватність умов оптимальності поточкорозподілу ЛЕС з РДЕ.

Для вказаної схеми електричної мережі виконано ряд розрахунків режимів за різних значень потужності генерування РДЕ у заданому вузлі приєднання.

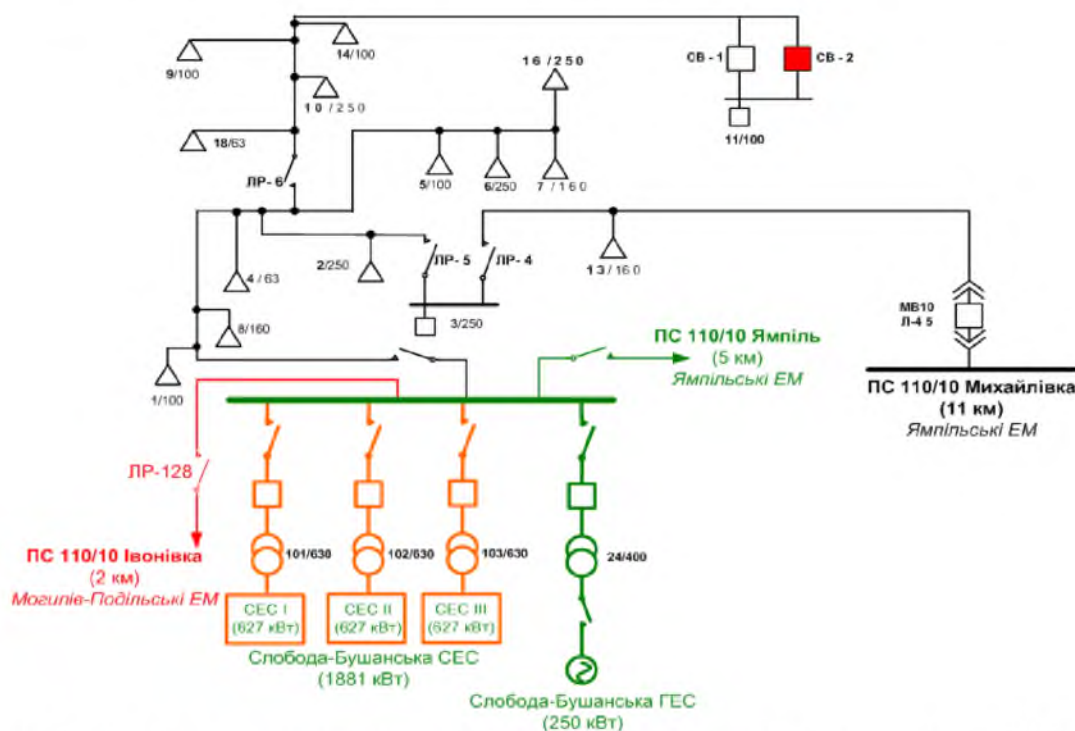


Рис. 2 – Варіанти приєднання Слобода-Бушанського комплексу РДЕ до електричних мереж

Параметри для розрахунку визначались за допомогою програми "Втрати 10/0,4 кВ". Було введено інформацію про підстанції (рис. 3), проводи, роз'єднувачі, що дало можливість порахувати втрати активної потужності у вітках схеми ЛЕС.

На рис. 4 наведено залежності dP' , dP'' та залежність їх суми від потужності генерування Слобода-Бушанського комплексу –

№	Назва	U, кВ	T, год	Wв, кВт год
1000	"Михайлівка"	10.00	24.0	
2000	"Ямпіль"	10.00	24.0	
3000	"Сл.Підлісська"	10.50	24.0	
4000	"Івонівка"	10.00	24.0	

№	Назва	I _{max} , А	I _{ср} , А	I _{min} , А	Wв, кВт год
1	ф.№42	48.00			
2	ф.№43	256.00			
3	ф.№45	134.00			
4	ф.№41	140.00			

Рис. 3 – Інформація про підстанції у програмі «Втрати-10/0,4»

РДЕ. Розрахунки проводились для незмінного значення генерування реактивної потужності на РДЕ і поступового зростання генерування активної потужності до встановленого значення.

З аналізу залежностей видно, що оптимальним режимом роботи комплексу РДЕ, який не погіршить критерії оптимальності функціонування ЛЕС та перспективність подальшого

розвитку ЕМ буде режим видачі потужності 371 кВт. Збільшення генерування призводить до підвищення втрат потужності у ЛЕС та ускладнень з подальшим розвитком РДЕ в досліджуваній локальній системі. Отже, діапазон потужностей РДЕ які доцільно приєднувати до підстанції «Михайлівка» становить біля 400 кВт.

Транспортування максимальної встановленої потужності Слобода-Бушанського комплексу РДЕ до енергетичного ринку з використанням електромереж, що аналізуються, призводить до збільшення втрат потужності, що співмірне з генеруванням Слобода-Бушанської ГЕС. Виходячи з цього, у проєкті приєднання даного комплексу РДЕ передбачено транспортування значної частини електроенергії іншими електромережами до шин підстанції «Івонівка» Могилів-Подільських ЕМ (2 км).

Таким чином, виконуючи оптимізацію схеми видачі електроенергії з використанням узагальнених показників dP' , dP'' додатково досягається вирівнювання профілю напруги, як показника якості електроенергії.

Висновки

1. Вдосконалено метод визначення коефіцієнтів чутливості втрат потужності у вітках до зміни генерування ВДЕ у ЛЕС. Він дозволяє оцінити чутливість сумарних втрат потужності в ЛЕС як критерію оптимальності її режимів та втрат потужності в окремих вітках електричних мереж до зміни генерування у вузлах з ВДЕ. Показано залежність коефіцієнтів чутливості втрат потужності у вітках від напруги у вузлах ЛЕС з ВДЕ.

2. Запропоновано використання узагальнених показників ефективності проєктних рішень схеми видачі електроенергії РДЕ у ЛЕС. Пропоновані показники мають фізичний зміст приростів відносних складових втрат від перетікань, відповідно, активної та реактивної потужностей. Вони можуть бути використані як якісний індикатор впливу параметрів окремого вузла на оптимальність режиму електричної мережі з урахуванням перспективності подальшого розвитку ЕМ в цілому та якості електроенергії.

3. Розроблено алгоритми визначення узагальненого показника функціонування електричної мережі за критерієм мінімуму втрат активної

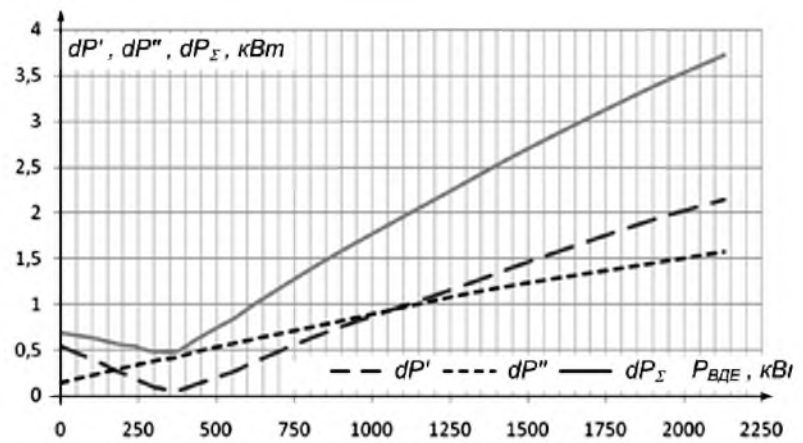


Рис. 4 – Залежності узагальнених показників ефективності проєктних рішень схеми видачі електроенергії Слобода-Бушанського комплексу РДЕ

потужності, визначення оптимальної встановленої потужності відновлюваних джерел енергії та пристроїв компенсації реактивної потужності з огляду на умови їх експлуатації в ЛЕС, електричної мережі електроенергії з використанням узагальненого показника функціонування ЛЕС. Застосування вказаних алгоритмів у контексті концепції активно-адаптивних мереж дозволить розв'язати задачі автоматизації узгодження графіків навантаження споживачів та джерел енергії.

4. Показано, що використання узагальнених показників ефективності проектних рішень схеми видачі електроенергії РДЕ дозволяє отримати достатньо ефективні схеми приєднання РДЕ до електромереж.

Список літератури: 1. NIST Releases Report on Smart Grid Development // National Institute of Standards and Technology (USA) – Recognized Standards for Inclusion In the Smart Grid Interoperability Standards Framework, Release 1.0 (електронний ресурс). Режим доступу: <http://collaborate.nist.gov/twiki-sggrid/bin/view/SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal>. 2. *El-Khattam, W.* Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market [Text] / *W. El-Khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy, M. M. A. Salama* // IEEE Trans. Power Syst. – 2004. – Vol. 19. – P. 1674-1684. 3. *Rau, N. S.* Optimum location of resources in distributed planning [Text] / *N. S. Rau, Y.-H. Wan* // IEEE Trans. Power Syst. – 1994. – Vol. 9 – P. 2014-2020. 4. *Caisheng, W., M.* An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements [Text] / *W. Caisheng, M. Hashem Nehrir* // IEEE Trans. Power Syst. – 2004. – Vol. 19. – P. 2068-2076. 5. *Falaghi, H.* ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems [Text] / *H. Falaghi, M. Haghifam* // PowerTech. – 2007. – P. 555-560. 6. *Hosseini, Nabavi S.M.* Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization [Text] // *S.M. Hosseini Nabavi, S. Hajforoosh, M.A. Masoum*, IEEE, 2011. – (електронний ресурс). Режим доступу: <http://www.researchgate.net/publication/265966164> Placement_and_sizing_of_distributed_generation_units_for_congestion_ anagement_and_improvement_of_voltage_profile_using_particle_swarm_optimization. 7. *Бурикін, О.Б.* Оптимізація режиму локальних електричних систем з відновлювальними джерелами енергії [Текст] / *О.Б.Бурикін, Ю.В. Малогулко* // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2013. – №2(15). – С. 42-46. 8. *Alinejad-Beromi, Y.* A Particle Swarm Optimization for Sizing and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network to Improve Voltage Profile and Reduce THD and Losses [Text] / *Alinejad-Beromi Y., Sedighzadeh M., Sadighi M.* // Universities Power Engineering Conference. – 2008. – P. 1-5. 9. *Liu, Zifa* Optimal Configuration for Capacity of Distributed Generation Interconnected to Distribution Network Based on Improved [Text] / *Liu Zifa, Wu Ziping, Xue Xiaoqiang, Zhang Jianhua* // Sustainable Power Generation and Supply. – 2009. – P. 1-5. 10. *Лежнюк, П.Д.* Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами [Текст] / *П.Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О.Б. Бурикін* // Вінниця. – УНІВЕРСУМ–Вінниця. – 2008. – 123 с. 11. *Лежнюк, П. Д.* Определение и анализ потерь мощности от транзитных перетоков в электрических сетях энергосистем методом линеаризации [Текст] / *П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, А. Б. Бурыкин* // Электрические сети и системы. – 2006. – №1. – С. 5–11. 12. *Абраменкова, Н. А.* Структурный анализ электро-энергетических систем в задачах моделирования и синтеза [Текст] / *Н.А. Абраменкова, Н.И. Воронай, Т.Б. Заславская* // Новосибирск: Наука, 1990. – 224 с. 13. *Войтов, О. Н.* Анализ неоднородностей электроэнергетических систем [Текст] / *О. Н. Войтов, Н. И. Воронай, А. З. Гамм и др.* // Новосибирск: Наука, 1999. – 250 с. 14. *Воеводин, В. В.* Матрицы и вычисления [Текст] / *В. В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов* – М. : Наука, 1984. — 320 с.

Bibliography (transliterated): 1. NIST Releases Report on Smart Grid Development. Recognized Standards for Inclusion In the Smart Grid Interoperability Standards Framework. National Institute of Standards and Technology (USA). Release 1.0. 2. *El-Khattam, W., Bhattacharya, K., Hegazy, Y., Salama, M. A.* (2004). Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive

Electricity Market. *IEEE Trans. Power Syst.*, 19, 1674-1684. **3.** *Rau, N. S., Wan, Y.-H.* (1994). Optimum location of resources in distributed planning. *IEEE Trans. Power Syst.*, 9, 2014-2020. **4.** *Caisheng, W., Hashem Nehrir, M.* (2004). An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements. *IEEE Trans. Power Syst.*, 19, 2068-2076. **5.** *Falaghi, H., Haghifam, M.* (2007). ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems. *PowerTech*, 555-560. **6.** *Hossein Nabavi, S. M., Hajforoosh, S., Masoum, M. A.* (2011). Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization. *IEEE*. **7.** *Burikin, O. B. Malogulko, Yu. V.* (2013). Optimizatsiya rezhimu lokalnih elektrichnih sistem z vidnovlyuvalnimi dzherelami energiyi. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotehnika i energetika»*, 2(15), 42-46. **8.** *Alinejad-Beromi, Y., Sedighizadeh, M., Sadighi, M.* (2008). Particle Swarm Optimization for Sizing and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network to Improve Voltage Profile and Reduce THD and Losses. *Universities Power Engineering Conference*, 1-5. **9.** *Liu Zifa, Wu Ziping, Xue Xiaoqiang, Zhang Jianhua.* (2009). Optimal Configuration for Capacity of Distributed Generation Interconnected to Distribution Network Based on Improved. *Sustainable Power Generation and Supply*, 1-5. **10.** *Lezhnyuk, P. D. Kulik, V. V. Burikin, O. B.* (2008). Vzaemovpliv elektrichnih merezh i sistem v protsesi optimalnogo keruvannya yih rezhimami. *UNIVERSUM*, 123. **11.** *Lezhnyuk, P. D., Kulik, V. V., Burykin, A. B.* (2006). Opredelenie i analiz poter moshchnosti ot tranzitnyh peretokov v elektricheskikh setyah energosistem metodom lineari-zatsii. *Elektricheskie seti i sistemy*, 1, 5-11. **12.** *Abramenkova, N. A., Voropay, N. I., Zaslavskaya, T. B.* (1990). Strukturnyy analiz elektroenergeticheskikh sistem v zadachah modelirovaniya i sinteza. *Novosibirsk: Nauka*, 224. **13.** *Voytov, O. N., Voropay, N. I., Gamm. A. Z.* (1999). Analiz neodnorodnostey elektroenergeticheskikh sistem. *Novosibirsk: Nauka*, 250. **14.** *Voevodin, V. V., Kuznetsov, Yu. A.* (1984). Matritsy i vychisleniya. *Nauka*, 320.

Надійшла (received) 17.12.2014

УДК 519.6:001.5

Д. А. ЛЕВКІН, аспірант, ХНТУСГ ім. Петра Василенка, Харків

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДІЇ ЛАЗЕРНОГО ПРОМЕНЯ НА БАГАТОШАРОВІ БІОСИСТЕМИ

Для побудови адекватних оптимізаційних математичних моделей, обґрунтована адекватність розрахункових математичних моделей, що описують процес дії променя лазера на багат шарові (N-шарові) мікробіологічні матеріали. З цією метою досліджена багатоточкова крайова задача для багат шарового мікробіологічного середовища і доведена коректність такої задачі при малих обуреннях. Цей результат дозволяє гарантувати адекватність прикладних оптимізаційних математичних моделей.

Ключові слова: адекватність, оптимізаційна модель, лазер, мікробіологічний матеріал, крайова задача, коректність.

Вступ. Успішне розв'язання задач розрахунку і оптимізації фізичних полів в багат шарових системах, які знаходяться під впливом зосереджених рухомих джерел, вимагає розробки і дослідження відповідних адекватних математичних моделей. При цьому адекватними повинні бути, як розрахункові математичні моделі, так і оптимізаційні моделі. Забезпечення цього дозволить розширити арсенал ефективних засобів автоматизації проектування складних систем.

Багат шарові системи, що розглядаються в даній роботі, є мікробіологічним матеріалом, що піддається дії на нього лазерним випромінюванням для здійснення

© Д. А. ЛЕВКІН, 2014

його сегментації (ділення, розкрою). При цьому ставиться основна задача: оптимізація параметрів теплової дії за обмеженнями на характер розподілу температурного поля в багатошаровій системі з забезпеченням життєздатності сегментів матеріалу.

Така постановка основної задачі характерна для: підвищення якості процесу розкрою штучної і натуральної шкіри при лікуванні обширних опіків; зварювання біоматеріалу; ділення ранніх елітних ембріонів, з метою подальшої трансплантації частин ембріонів; для використання методики в практиці мікрохірургії, офтальмології, косметології і інших галузях.

Наукова актуальність цієї проблеми і її практична значущість привертала увагу до цих питань багатьох вчених Бутковського А. Г. [1], Комяк В. М. [2], Макарова А. А. [3], Мацевитого Ю. М. [4], Мегеля Ю. Е. [5], Путятіна В. П. [6], Рвачёва В. Л. [7], Слесаренко А. П. [7], Стояна Ю. Г. [6], Чубарова Е. П. [8], Antinori S. [9], Obrusa A. [10], Douglas D. H. [11]. Проте, отримані на сьогодні результати досліджень носять, в основному, вузькопрофесійний характер і проблема не розглядалася в цілому. Для її цілісного розгляду необхідно запропонувати міждисциплінарний підхід, що базується на останніх досягненнях теорії математичного моделювання, математичної фізики, теплофізики, теорії розрахунку та оптимізації багатошарових систем, методів управління рухомою дією в системах з розподіленими параметрами. Просуванню в цьому напрямі і присвячена дана стаття.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка математичних моделей, чисельних методів і алгоритмів для підвищення якості біотехнологічного процесу лазерної сегментації багатошарового мікробіологічного матеріалу за критерієм життєздатності частин біоматеріалу.

Математичні моделі прикладних задач оптимізації та базовий алгоритм їх чисельної реалізації. Аналіз наукових публікацій показав, що існуючі нечисленні математичні моделі задач розрахунку і оптимізації параметрів дії лазерного випромінювання на багатошарові мікробіологічні матеріали розглядалися раніше за принципом: математична модель під конкретну задачу. При цьому математичним моделям оптимізації параметрів дії лазерного випромінювання присвячено відносно мало праць і пов'язано це, перш за все, з необхідністю та складністю розв'язання специфічних, багатовимірних, багатоекстремальних задач. Причому, стан об'єкта дослідження (багатошаровий мікробіоматеріал під дією лазерного випромінювання) описується крайовою задачею для системи диференціальних рівнянь з частинними похідними (система з розподіленими параметрами).

Для доказу умов коректності крайової задачі, можливо, скористатися методом параметрикса, розглянутого в роботі [3]. На основі даного методу було з'ясовано, якими псевдодиференціальними операторами можливо обурювати праву частину основного рівняння крайової задачі (джерело дії), щоб вона залишалася коректною. Отримані результати дозволяють застосувати вказаний вище метод для визначення і доказу умов коректності крайової задачі теплопровідності, яка є основою розрахункової математичної моделі для кулястого біоматеріалу з неоднорідними включеннями. Це дало можливість: по-перше, обґрунтування адекватності розрахункових математичних моделей, що описують процес дії

лазерного променя на багатошарові (N -шарові) мікробіологічні матеріали; по-друге, гарантування адекватності прикладних оптимізаційних математичних моделей.

В роботі запропоновано спосіб параметричного представлення розв'язку крайової задачі залежно від змінних параметрів дії лазерного променя на багатошаровий мікробіологічний матеріал. Таким шуканим вектором параметрів лазера є вектор $z^* = (x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), S)$, де $(x, y, z) \in \Omega^*$ – область багатошарового (N -шарового) мікробіологічного матеріалу Ω ; t – час дії лазерного променя; u – інтенсивність джерела лазерного променя, тобто пята; E – енергія теплового впливу на багатошаровий мікробіологічний матеріал; $s(t)$ – траєкторія руху лазерного джерела, тобто пята; $v(t)$ – швидкість руху джерела; $Q(x, y, z, t)$ – густина теплового впливу; S – діаметр лазерного джерела. На ці параметри накладаються додаткові двохсторонні умови їх зміни. Винятком є траєкторія руху лазерного джерела.

В загальному випадку, цільова функція має вигляд:

$$T = T(x, y, z, t, z^*). \quad (1)$$

де $T(x, y, z, t, z^*)$ – температурне поле, $(x, y, z) \in \Omega^*$ – область багатошарового (N -шарового) мікробіологічного матеріалу, t_0 – початковий момент часу t , t^* – кінцевий момент часу t , а z^* – вектор параметрів теплової дії на багатошаровий (N -шаровий) мікробіологічний матеріал.

Таким чином, необхідно знайти

$$\underset{\substack{(x, y, z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t^*] \\ z^* \in Z}}{extr} T(x, y, z, t, z^*), \quad (2)$$

де Z – область допустимих значень шуканих параметрів z^* лазера, яка описується системою відповідних обмежень.

Тобто, необхідно знайти такі параметри вектора z^* , які б забезпечували виконання екстремуму (2) в області Ω^* . Ними будуть

$$z_0^* = \arg \underset{\substack{(x, y, z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t^*] \\ z^* \in Z}}{extr} T(x, y, z, t, z^*), \quad (3)$$

де z_0^* – вектор параметрів лазера.

Розглянуті особливості математичної моделі основної оптимізаційної задачі та прикладних задач оптимізації. До цих особливостей належать:

1. Даний клас систем (багатошарові мікробіологічні матеріали, на які діє промінь лазера) відноситься до класу систем з розподіленими параметрами. Це обумовлено тією обставиною, що процес дії променя лазера на матеріал, в загальному випадку, описується системою нестационарних, багатовимірних диференціальних рівнянь теплопровідності з частинними похідними.

За класифікацією систем з розподіленими параметрами А.Г. Бутковського [2], розглянуті нами системи (навіть в лінійній постановці крайових задач), відносяться до класу з індексами (3.1.2), де перший параметр – розмірність просторової області Ω^* біоматеріалу, в якій визначена функція T (температурного

поля) даної задачі, другий параметр – найвищий порядок похідних функції T по незалежній часовій змінній t (час) в основному рівнянні задачі, а третій параметр – найвищий порядок похідних функції T по просторовій змінній в основному рівнянні задачі.

2. *Розмірність простору шуканих параметрів залежить від числа змінних характеристик теплової дії на багат шарові мікробіологічні матеріали: потужність, радіус пятна променя лазера, швидкість руху пятна, його траєкторія переміщення та ін. До цих параметрів додатково додається число та координати точок контролю температурного поля багат шарового мікробіологічного матеріалу.*

3. *Функції мети в прикладних оптимізаційних математичних моделях є нестационарними, нелінійними, багатовимірними.* Крім того, обчислення значень функцій мети вимагає багаторазового розв'язання відповідних крайових задач.

4. *Система обмежень, що накладається на межі зміни шуканих параметрів, в загальному випадку, є нелінійною.* Число обмежень залежить від числа шуканих (змінних) параметрів. При цьому найбільш трудомісткими обмеженнями, за витратами часу на їх аналіз, є нелінійні обмеження на температурне поле багат шарового мікробіологічного матеріалу. Це пов'язано з необхідністю багатократного розв'язання крайової задачі для аналізу відповідних обмежень.

5. *Область допустимих розв'язків, в загальному випадку, багатозв'язна.* Це витікає вже з того, що мікробіологічний матеріал може мати складну просторову форму з наявністю областей заборони на проходження трас розподілу матеріалу (зони заборони).

6. На основі приведених вище особливостей, можна зробити висновок про те, що, з одного боку, даний клас задач відноситься до задач управління багатовимірними системами з розподіленими параметрами (див. першу особливість), а з іншого – до неklasичних задач нелінійного математичного програмування спеціального вигляду. При цьому зведення задачі управління до задачі математичного програмування здійснюється вже на етапі чисельної реалізації, після застосування процедури просторово-часової апроксимації.

7. *Багатоекстремальність* даних задач оптимізації обумовлена приведеними особливостями пунктів 3 – 5, що утрудняє пошук оптимального розв'язку (глобального екстремуму). На практиці частіше за все зупиняються на раціональному (рекордному) значенні функції мети.

8. *Число локальних екстремумів залежить від розмірності простору шуканих параметрів, просторової форми початкової області розкרוю біоматеріалу, просторових форм областей заборони на траєкторії пересування променя лазера.*

9. Враховуючи те, що в загальному випадку дані крайові задачі є багатовимірними, нелінійними і нестационарними, то розраховувати на використання відповідних аналітичних розв'язків не доводиться. Ці труднощі необхідно долати на основі застосування чисельних методів.

10. З обчислювальної точки зору основна специфіка чисельної реалізації прикладних оптимізаційних математичних моделей полягає в тому, що для організації процедур пошуку і направленої перебору локальних екстремумів

необхідне багатократне розв'язання відповідних крайових задач для кожної ітерації. Це, у свою чергу, вимагає значних часових витрат цифрових ПЕОМ і тим самим знижує точність розв'язку оптимізаційної задачі в цілому.

11. Відзначимо, що одним з шляхів подолання складнощів (див. пункти 9 і 10 особливостей) чисельної реалізації прикладних оптимізаційних математичних моделей, є застосування спеціалізованих аналогових або аналого-цифрових (гібридних) сіткових процесорів.

Наведемо приклади двох задач оптимізації та їх математичні моделі:

Приклад 1. Необхідно мінімізувати, за параметрами теплової дії лазерного променя, максимальне значення температурного поля в області багат шарового біологічного матеріалу. Тобто знайти такі параметри z^* теплової дії, щоб забезпечити ділення матеріалу і при цьому досягався

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t^*]}} T(x, y, z, t, z^*). \quad (4)$$

В даній математичній моделі $T(x, y, z, t, z^*)$ є температурним полем області $(x, y, z) \in \Omega^*$ багат шарового (N -шарового) біоматеріалу Ω , t_0 і t^* – початковий і кінцевий моменти часу t , z^* – вектор параметрів теплової дії на багат шаровий (N -шаровий) біологічний матеріал, Z – область допустимих значень шуканих параметрів z^* лазера, яка описується відповідною системою обмежень.

Приклад 2. У разі, коли достатньо мати об'ємну характеристику життєздатних зародків, наприклад, при діленні ембріона, то така постановка задачі приводить до пошуку та максимізації відсотка K життєздатності зародків:

$$K = \frac{V_{\text{сегм.бл.}}(T)}{V_1} \times 100\%. \quad (5)$$

При цьому: $V_{\text{сегм.бл.}}(T)$ – об'єм опроміненого сегмента зародків багат шарового (3-х шарового) мікробіологічного об'єкта (ембріона); V_1 – об'єм слою зародків.

У свою чергу, об'єм опроміненого сегмента багат шарового мікробіологічного об'єкта (ембріона) можливо знайти за наступною формулою

$$V_{\text{сегм.бл.}}(T) = \pi \left(r_1 h_1 - \frac{h_1^3}{3} \right). \quad (6)$$

При цьому: r_1 – глибина проникнення лазерного променя в зародки; h_1 – відрізок просторової координати r_1 .

Крім того, для оцінки локального нагріву зародків повинна виконуватися наступна система:

$$V_{\text{сегм.бл.}}(T) = \begin{cases} V_{\text{сегм.1}}, & \text{если } T_i > T^*; \\ V_{\text{сегм.2}}, & \text{если } T_i \leq T^*, \end{cases} \quad (7)$$

де $V_{\text{сегм.1}}$ – об'єм термічно-травмованого сегмента зародків; $V_{\text{сегм.2}}$ – об'єм життєздатних зародків.

Необхідно також врахувати, що T_i – значення температурного поля в точках зародків, T^* – допустима температура в точках, що належать зародкам.

Виходячи зі співвідношень (5) – (7), справедлива наступна математична модель оптимізації:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{сегм.бл.}}(T) = V_{\text{сегм.1}}, \quad K \rightarrow \min; \\ \begin{array}{l} (x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t_1] \\ z^* \in Z \\ i = 1, N \end{array} \\ \\ V_{\text{сегм.бл.}}(T) = V_{\text{сегм.2}}, \quad K \rightarrow \max; \\ \begin{array}{l} (x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t_1] \\ z^* \in Z \\ i = 1, N \end{array} \end{array} \right. \quad (8)$$

При цьому: $V_{\text{сегм.1}}$ – об'єм термічно-травмованого сегмента зародків; $V_{\text{сегм.2}}$ – об'єм життєздатного сегмента зародків; $(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \in \Omega^*, i = 1, \dots, N$ – область зародків багаточарового (3-х шарового) мікробіологічного об'єкта (ембріона) Ω ; z^* – вектор шуканих параметрів дії лазера на зародки; Z – область допустимих значень шуканих параметрів z^* лазера, яка описується відповідною системою обмежень.

Наведені вище особливості даних прикладних математичних моделей дають необхідну інформацію для обґрунтування чисельного методу їх реалізації.

В статті наведемо базовий алгоритм чисельної реалізації математичних моделей прикладних задач оптимізації параметрів дії лазерного променя на багаточаровий мікробіологічний матеріал.

КРОК 1. Введення вихідних даних: просторова форма мікробіоматеріала; геометричні розміри мікробіоматеріала; кроки дискретизації мікробіоматеріала; коефіцієнти, що входять у постановку вихідної крайової задачі; параметри обчислювального процесу для чисельної реалізації крайової задачі; параметри обчислювального процесу для чисельної реалізації крокового методу оптимізації; критерій припинення пошуку локального екстремума й перебору локальних екстремумів.

КРОК 2. Здійснюється завдання першого наближення компонентів вектора z^* параметрів теплового впливу. Ця вихідна інформація може бути сформована на основі експертного оцінювання результатів застосування подібної лазерної технології та погоджена з можливостями застосовуваних технічних засобів.

КРОК 3. Здійснюється аналіз виконання заданої (крок 1) системи обмежень на компоненти вектора z^* параметрів теплового впливу.

Якщо обмеження на параметри не виконуються (НІ), то здійснюється повернення до блоку завдання (до кроку 2) нових значень параметрів теплового впливу й процес повторюється від кроку 2 до кроку 3.

Якщо обмеження виконуються (ТАК) і технічні засоби дозволяють забезпечити завдання цих значень параметрів, то здійснюється перехід до блоку розв'язку відповідної крайової задачі (до кроку 4).

КРОК 4. На основі вихідних даних, заданих на кроках 1 – 3 здійснюється формування й розв'язання крайової задачі, що описує температурне поле в мікробіоматеріалі при впливі на нього лазерного променя.

КРОК 5. Відповідно до виду функції мети математичної моделі задачі оптимізації здійснюється пошук і аналіз локальних екстремумів.

КРОК 6. Отримане на кроці 5 значення локального екстремума порівнюється з наперед заданим (крок 1) значенням критерію припинення пошуку.

Якщо критерій припинення пошуку локального екстремума виконується (ТАК) – здійснюється перехід до кроку 8.

Якщо критерій не виконується (НІ) – здійснюється перехід до кроку 7.

КРОК 7. Здійснюється завдання (корекція) значень параметрів лазерного впливу й далі обчислювальний процес спрямовується до кроків 3, 4, 5, 6 і повторюється до моменту виконання (ТАК) на кроці 6.

КРОК 8. Здійснюється аналіз локальних екстремумів і фіксується рекордне значення. Це значення надходить на вхід кроку 9 для аналізу виконання критерію припинення пошуку рекордного значення функції мети.

КРОК 9. Якщо критерій припинення пошуку рекордного значення екстремума не виконується (НІ) – обчислювальний процес спрямовується до кроку 7 і здійснюється завдання (корекція) значень параметрів лазера.

Далі обчислювальний процес спрямовується до кроків 7, 3, 4, 5, 6 і повторюється до моменту (ТАК) на кроці 9.

КРОК 10. Якщо на кроці 9 критерій припинення пошуку виконується (ТАК) – пошуковий процес оптимізації припиняється й на виході фіксується рекордне значення функції мети, а також відповідний рекордний вектор z^* раціональних параметрів теплового впливу лазера на біоматеріал.

Висновки. Запропоновані математичні моделі, чисельні методи, алгоритми є подальшим розвитком методів математичного моделювання, що дозволяють автоматизувати процес міждисциплінарного дослідження математичних моделей. Крім того, це дає можливість здійснити ефективно розв'язання важливих прикладних задач, пов'язаних з оптимізацією теплофізичних процесів в мікробіологічних системах. За наслідками проведеного дослідження можна зробити наступні основні висновки:

1. Вперше запропонована математична модель основної оптимізаційної задачі, що є багатовимірною, нестационарною, нелінійною і багатоекстремальною задачею оптимізації параметрів процесу лазерної локальної теплової дії на багат шаровий мікробіологічний матеріал з урахуванням обмежень на результуюче температурне поле біоматеріалу. Здійснена формалізація і систематизація прикладних задач оптимізації, які є частковими випадками основної оптимізаційної задачі. Досліджені специфічні особливості їх математичних моделей, що дозволило обгрунтовано здійснити вибір методів їх чисельної реалізацій.

2. Вперше з метою побудови адекватних оптимізаційних математичних моделей обгрунтована адекватність розрахункових математичних моделей, що описують процес дії променя лазера на багат шарові (N-шарові) мікробіологічні матеріали. З цією метою досліджена багатоточкова крайова задача для багат шарового мікробіологічного середовища і доведена коректність такої задачі при малих обуреннях. Цей результат дозволяє гарантувати адекватність прикладних оптимізаційних математичних моделей.

3. Запропонована модифікація пошукового методу оптимізації, що враховує специфіку математичних моделей і заснована на композиції послідовно вживаних чисельних методів, створюючих обчислювальну структуру. Запропонований базовий алгоритм для реалізації обчислювальної структури. При цьому чисельна

реалізація прикладних оптимізаційних математичних моделей вимагає зміни лише композиції чисельних методів у відповідних обчислювальних структурах.

4. Рекомендується застосування розглянутих математичних моделей, чисельних методів для: підвищення якості процесу розкрою штучної та натуральної шкіри при лікуванні обширних опіків; для зварювання біоматеріалу; для ділення ранніх елітних ембріонів, з метою подальшої трансплантації частин ембріонів; а також для використання в практиці мікрохірургії, офтальмології, косметології та інших галузях.

Список літератури: 1. *Бутковский, А. Г.* Характеристики систем с распределёнными параметрами [Текст] / *Бутковский А. Г.* – М.: Наука, 1979. – 224 с. 2. *Котуак, В. М.* Geometrical design elements in solving applied problems [Text] / *Котуак В. М.* // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА, 2002. – Вип. 70. – С. 126 – 131. 3. *Макаров, А. А.* Параболические краевые задачи для систем псевдодифференциальных уравнений в бесконечном слое [Текст] / *Макаров А. А.* // Дифференциальные уравнения. 1996. – Т. 32. № 5. – С. 636 – 642. 4. *Мацевитый, Ю. М.* Обратные задачи теплопроводности в 2 - х т. [Текст] / *Мацевитый Ю. М.* – К.: Наук. думка, 2003. – Т.2.: Приложения. – 392 с. 5. *Мегель, Ю. Е.* Обработка визуальной информации для оценки состояния биообъектов с помощью автоматической системы / *Ю. Е. Мегель, А. И. Рыбалка.* // АСУ и приборы автоматики. – Х.: Выща школа, 2002. – Вип. 118. – С. 11 –16. 6. *Стоян, Ю. Г.* Размещение источников физических полей [Текст] / *Ю. Г. Стоян, В. П. Пуятин.* – К.: Наук. думка, 1981. – С. 59 – 87. 7. *Рвачев, В. Л.* Алгебра логики и интегральные преобразования в краевых задачах / *В. Л. Рвачев, А. П. Слесаренко.* – К.: Наук. думка, 1976. – 290 с. 8. *Чубаров, Е. П.* Контроль и регулирование с подвижным локальным воздействием [Текст] / *Чубаров Е. П.* – М.: Энергия, 1977. – 208 с. 9. *Antinori, S.* Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human [Text] / *Antinori S.* // J. of Assist Reprod and Genet. – 1997. – №14(5). – 200 p. 10. *Obruca, A.* Use of lasers in assisted fertilization and hatching [Text] / *Obruca A.* // Hum R. – 1994. – №9. – pp. 1723 – 1726. 11. *Douglas-Hamilton D. H.* Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling / *D. H Douglas-Hamilton, J. Conia.* // J. Biomed Opt. – 2001. – № 6(2). – pp. 205 – 213.

Bibliography (transliterated): 1. *Butkovskiy, A. G.* (1979). Harakteristiki sistem s raspredelyonnyimi parametrami. 224 p. 2. *Komyak, V. M.* (2002). Geometrical design elements in solving applied problems. J. Prikladna geometriya ta Inzhenerna grafika. V. 70., pp. 126 – 131. 3. *Makarov, A. A.* (1996). Parabolicheskie kraevyye zadachi dlya sistem psevdodifferentsialnykh uravneniy v beskonechnom sloe. J. Differentsialnyie uravneniya., Vol. 32, № 5, pp. 636 – 642. 4. *Matsevityiy, Yu. M.* (1996). Obratnyie zadachi teploprovodnosti. 392 p. 5. *Megel Yu. E., Ryibalka, A. I.* (2002). Obrabotka vizualnoy informatsii dlya otsenki sostoyaniya bioob'ektov s pomoschy avtomaticheskoy sistemyi. J. ASU i priboryi avtomatiki.. № 118. pp. 11 –16. 6. *Stoyan, Yu. G., Putyatin, V. P.* (1981). Razmeschenie istochnikov fizicheskikh poley. pp. 59 – 87. 7. *Rvachev, V. L., Slesarenko, A. P.* (1976). Algebra logiki i integralnyie preobrazovaniya v kraevyih zadachah. 290 p. 8. *Chubarov, E. P.* (1977). Kontrol i regulirovanie s podvizhnyim lokalnyim vozdeystviem. 208 p. 9. *Antinori, S.* (1977). Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human. J. of Assist Reprod and Genet. 200 p. 10. *Obruca, A.* (1994). Use of lasers in assisted fertilization and hatching. J. Hum R., №9., pp. 1723 – 1726. 11. *Douglas-Hamilton D.H., Conia J.* (2001). Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling. J. Biomed Opt, №6 (2). pp. 205 – 213.

Поступила (received) 15.12.2014

С. Н. ИЕВЛЕВА, канд. техн. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков;
Е. С. ИЕВЛЕВ, аспирант, ХНУРЭ, Харьков

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ КОРПОРАТИВНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрена задача выявления узких мест компьютерной корпоративной сети с использованием коэффициента загруженности элементов, что позволяет с помощью метода статистических испытаний осуществить разбиение входящих в компьютерную сеть элементов по принадлежности их к критической, пограничной и рабочей зоне; показано, что имитационное моделирование является важной частью систем проектирования и управления ККС

Ключевые слова: компьютерная корпоративная сеть, коэффициент загруженности, узкое место, скорость передачи трафика, производительность.

Введение. В настоящее время, в условиях недостаточного финансирования информационных технологий на предприятиях, эффективность построения и функционирования корпоративных компьютерных сетей (ККС) является чрезвычайно актуальной задачей.

Наиболее распространенным подходом к проектированию и построению ККС является использование экспертных оценок, в соответствии с которым специалисты в области компьютерных сетей на основании своего опыта осуществляют проектирование сети, необходимой для обеспечения функционирования предприятия и решения поставленных задач. Этот подход позволяет быстро оценить стоимость реализации ККС и минимизировать затраты на этапе её проектирования, однако решения, полученные с использованием экспертных оценок, носят исключительно субъективный характер (например, требования к оборудованию, программному обеспечению и т.п.), что приводит к логичному вопросу об оценке работоспособности, эффективности и возможного развития проектируемой системы.

В качестве альтернативного подхода можно использовать имитационный метод моделирования работы ККС, который позволяет воспроизводить события, происходящие в реальной системе (процессы генерации сообщений приложениями, разбиение сообщений на пакеты определенных протоколов, задержки, связанные с обработкой сообщений, пакетов внутри операционной системы, процесс получения доступа компьютером к разделяемой сетевой среде, процесс обработки поступающих пакетов маршрутизатором и т.д.). Преимуществом имитационных моделей является возможность подмены процесса смены событий в исследуемой системе в реальном масштабе времени на ускоренный процесс смены событий в темпе работы программы. В результате за несколько минут можно воспроизвести работу сети в течение нескольких дней, что дает возможность оценить работу сети в широком диапазоне варьируемых параметров [1].

Целью данной работы является разработка метода анализа вероятностных параметров моделей ККС, на основе имитационного моделирования, позволяющего выявлять узкие места КС.

Требования к производительности корпоративных компьютерных сетей. Основным требованием, предъявляемым к ККС, является выполнение сетью ее основной функции – обеспечение пользователям потенциальной возможности доступа к разделяемым ресурсам всех компьютеров, объединенных в сеть. Все остальные требования – производительность, надежность, совместимость, управляемость, защищенность, расширяемость и масштабируемость – связаны с качеством выполнения этой основной задачи. [2]

Конечно, все требования важны, но чаще понятие «качество обслуживания» (Quality of Service, QoS) компьютерной сети трактуется более узко – в него включаются только две самые важные характеристики сети – производительность и надежность. [3]

Высокая производительность – это одно из основных преимуществ распределенных систем, к которым относятся ККС. Основные характеристики производительности сети [4]:

- время реакции;
- скорость передачи трафика;
- пропускная способность;
- задержка передачи и вариация задержки передачи.

Время реакции сети определяется как интервал между возникновением запроса пользователя к какой-либо сетевой службе и получением ответа на него. В общем случае время реакции складывается из нескольких составляющих [3]: время подготовки запросов на клиентском компьютере; время передачи запросов между клиентом и сервером через сегменты сети и промежуточное коммуникационное оборудование; время обработки запросов на сервере; время передачи ответов от сервера клиенту и время обработки получаемых от сервера ответов на клиентском компьютере.

Производительность сети может характеризоваться также скоростью передачи трафика. Скорость передачи трафика может быть мгновенной, максимальной и средней [4]. Средняя скорость определяется путем деления общего объема переданных данных на время их передачи, при этом рассматриваемый период времени должен быть достаточным, что бы можно было говорить об устойчивости случайной величины, которой является скорость; для определения мгновенной скорости усреднение проводится на маленьком промежутке времени (например, 10 мс или 1 с); максимальная скорость — это наибольшая скорость, которую разрешается достигать пользовательскому потоку в течение периода наблюдения.

При проектировании, настройке и оптимизации ККС чаще всего используются понятие средней и максимальной скорости. При этом средняя скорость, позволяет оценить работу сети на протяжении длительного времени, в течение которого в силу закона больших чисел пики и спады интенсивности трафика компенсируют друг друга. Максимальная скорость дает возможность оценить, как сеть будет справляться с пиковыми нагрузками, характерными для особых периодов работы, например в утренние часы, когда сотрудники предприятия почти одновременно регистрируются в сети и обращаются к разделяемым файлам и базам данных [3].

Пропускная способность – это максимально допустимая скорость обработки трафика, которая определяется стандартами сети. Она показывает, какой максимальный объем может быть передан в единицу времени (чаще всего это одна секунда). Эта величина не зависит от загруженности сети, так как отражает именно максимально возможную скорость. Чаще всего она измеряется в битах в секунду (в современных сетях обычно в мегабитах), однако также допустимо характеризовать пропускную способность сети по количеству переданных в единицу времени пакетов.

Учитывая, что пропускная способность непосредственно характеризует процесс транспортировки данных по сети, то этот показатель чаще других используют при анализе производительности сети.

Задержка передачи определяется как задержка между моментом поступления данных на вход какого-либо сетевого устройства или части сети и моментом появления их на выходе этого устройства. Этот параметр производительности по смыслу близок ко времени реакции сети, но отличается тем, что всегда характеризует только сетевые этапы обработки данных, без задержек обработки конечными узлами сети. Обычно качество сети характеризуют величинами максимальной задержки передачи и вариацией задержки. [3]

Стоит отметить, что оценка указанных характеристик позволяет решать массу задач на этапе проектирования и анализе функционирования компьютерных сетей.

Рассмотрим одну из приоритетных задач анализа производительности ККС – выявление узких мест. Решение поставленной задачи на этапе проектирования может быть осуществлено с использованием имитационного моделирования ККС и анализа вероятностных параметров, характеризующих производительность сети.

Вероятностные параметры моделей корпоративных компьютерных сетей. Для выявления узких мест ККС можно использовать такую характеристику производительности сети как скорость передачи данных. Очевидно, что скорость передачи данных является случайной величиной и зависит от многих факторов как внутренних, так и внешних.

Применение метода статистических испытаний для оценки параметров моделей ККС позволяет распространить вероятностный подход и на некоторые параметры, характеризующие скорость передачи данных в сети.

Введем понятие коэффициента загруженности элемента ККС, определяемого по формуле:

$$k_3(L) = W\{k_3(L)\},$$

где $k_3(L)$ – коэффициент загруженности L -го элемента сети в момент времени, вычисляемого по формуле:

$$k_3(L) = \frac{\lambda_p(L)}{\lambda_{\max}(L)},$$

где $\lambda_p(L)$ – реальная скорость передачи данных по L -му элементу сети, $\lambda_{\max}(L)$ – максимальная скорость передачи данных по L -му элементу сети.

Для получения значения $W\{k_3(L)\}$ необходимо многократно «разыграть» методом статистических испытаний скорость передачи данных в сети, каждый раз после «розыгрыша» фиксируя значение исследуемого коэффициента загруженности L -го элемента. Произведя достаточно большое количество

«розыгрышей» N , фиксируем верхний доверительный предел эмпирического распределения, состоящего из N значений $k_3(L)$.

Применение коэффициента загруженности элементов позволяет с помощью метода статистических испытаний осуществить разбиение входящих в компьютерную сеть элементов по принадлежности их к критической, пограничной и рабочей зоне.

Иными словами, все элементы, входящие в ККС должны быть отнесены к одной из трех зон:

а) критической зоне, к которой относятся все элементы с $W\{k_3(L)\} < p_1$, где значение p_1 близко к нулю ($p_1 \approx 0.1 \div 0.2$);

б) рабочей зоне, которая объединяет элементы со значениями $W\{k_3(L)\} > p_2$, где p_2 близко к единице ($p_2 \approx 0.8 \div 0.9$);

в) пограничной зоне, объединяющей элементы со средними значениями коэффициентов: $p_1 \leq W\{k_3(L)\} \leq p_2$.

При этом элементы, попадающие в критическую зону можно отнести к узким местам ККС.

Заметим, что алгоритм расчета вероятностных коэффициентов загруженности (и тем самым разбиения элементов, входящих в ККС, по зонам) может использовать и другой принцип, основанный на оценке вероятности попадания элемента в каждую из зон в случае конкретной реализации передачи трафика. Такая постановка вопроса, относительно вероятности для определенного, фиксированного элемента в случае реализации передачи трафика в ККС оказаться в критической зоне, то есть обладать коэффициентом загруженности, близким к нулю, является вполне корректной.

Заметим, что для всех ККС со случайными оценками продолжительности передачи пакетированных данных, мы в состоянии лишь оценить вероятность того, что элемент ККС будет иметь коэффициент загруженности, меньше p_1 , то есть будет принадлежать к критической зоне. Действуя аналогичным образом в отношении всех входящих в ККС элементов, можно выделить группы, имеющие тенденцию лежать в критической зоне, и, наоборот, группу элементов, которые не попадают, как правило, на напряженные пути. Разбиение элементов, входящих в ККС, на «напряженные» и «ненапряженные» может быть проведено методом статистического моделирования (методом Монте-Карло) по следующей методике.

Зафиксируем две вероятности p_1 и p_2 , причем $p_2 < p_1$. Установим, что если вероятность p_i для элемента l оказаться критической (то есть иметь коэффициент загруженности близкий к нулю), меньше значения p_2 , то элемент l относится к «напряженной» зоне. Если же значение элемента p_i больше величины p_1 , относим элемент l ко второй, «ненапряженной» зоне. При наличии неравенства $p_2 < p_i < p_1$ элемент l должен быть отнесен к третьей, «промежуточной» зоне. Моделируем продолжительность передачи пакетов данных по всем элементам, входящих в ККС, после чего определяем, какие из этих элементов (в ККС с фиксированными продолжительностями передачи данных по элементам) имеют коэффициент загруженности близкий к нулю – все эти работы будем считать «напряженными» и относящимися к «напряженной» зоне для случая одного «розыгрыша»

Множественно повторяя аналогичный «розыгрыш» (N раз), получаем для каждого элемента относительную частоту его попадания в «напряженную» зону $\bar{p}_l = \frac{N_l}{N}$, где N_l – количество случаев (из N «розыгрышей»), когда l -й элемент имеет значение $k_3(L)$ близкое к нулю. На основе теории проверки статистических гипотез сопоставляем величины \bar{p}_l , p_1 , p_2 и принимаем решение, относить ли l -й элемент к первой («напряженной») группе, входит ли он во вторую («ненапряженную») или относится к третьей («промежуточной») зоне. Эта задача может быть решена на основании применения интегральной теоремы Муавра-Лапласа.

Некоторые вопросы управления в вероятностных моделях корпоративных компьютерных сетей. Как известно [2], этапы проектирования и управления ККС подразделяются на две самостоятельные стадии: стадию разработки исходного проекта ККС и стадию оперативного управления, причем первая стадия предшествует последней.

Одним из важнейших этапов стадии разработки исходного проекта ККС является расчет ожидаемой производительности как всей ККС, так и производительность важнейших элементов, входящих в ККС.

На стадии разработки исходного проекта необходимо прежде всего задаться желаемой доверительной вероятностью производительности ККС, то есть задать коэффициент доверия p_3 . Величина задаваемого коэффициента доверия p_3 , естественно, зависит от сложности и новизны разрабатываемой компьютерной сети.

Расчетная производительность разрабатываемой ККС для случая стохастической модели со случайными оценками продолжительности передачи трафика определяется вычитанием из исходной производительности величины соответствующего коэффициента загрузки. В то же время, согласно описанной выше методике, основанной на теории статистического моделирования, фиксируется верхний доверительный предел эмпирического распределения, состоящего из N значений $k_3(L)$, т.е. соответствующий коэффициент доверия p_d . Если значение коэффициента p_d меньше заданного p_d (или в случае, если величина p_d вследствие ее малого значения не может гарантировать необходимую производительность проектируемой ККС), сетевые администраторы проекта проводят детальный анализ сети и делают выводы о возможности оптимизации. Рассмотрим некоторые способы анализа временных оценок параметров ККС со случайными оценками продолжительности передачи пакетов данных по сети.

Доверительные оценки производительности разрабатываемой ККС, в целом, могут анализироваться в сопоставлении с производительностью сети, если принять продолжительность передачи пакетов данных по элементам ККС равными их средним значениям. Такой анализ целесообразно производить на стадии проектирования ККС после первого проверочного расчета производительности сети.

Рассмотрим четыре случая, которые могут возникнуть при сопоставлении производительности ККС с полученными оценками:

I. Производительность ККС несущественно отличается от исходной, а оценки

(например, при $p = 0,7$ и $p = 0,8$) существенно отличаются друг от друга. Причина такого явления может состоять в следующем. Предположим, что многократно была реализована передача данных, по элементам, входящим в ККС, то есть многократно было промоделирована работа сети. Существуют элементы, которые при многократной реализации модели имеют тенденцию лежать на наиболее напряженном пути модели, т. е. входить в «напряженную» зону. Они характеризуются весьма большой дисперсией для распределения вероятностей случайного времени выполнения передачи данных по ним. Последнее обстоятельство может объясняться двумя причинами:

а) либо нет возможности заранее объективно оценить оптимистическую и пессимистическую оценки времени передачи пакетированных данных по элементам сети, вследствие чего разброс значений около среднего делается значительным;

б) либо эксперты, задающие оптимистическое и пессимистическое время передачи пакета данных по элементам ККС по каким-либо причинам проявили необъективность или некомпетентность и сознательно или случайно расширили области определения времени передачи данных по сети. Конечно, в таком случае необходимо установить те элементы ККС, для которых расширена область определения времени передачи данных и провести сужения интервала (a,b) , где a и b – соответственно, оптимистическая и пессимистическая оценки. Стоит отметить, что количество таких элементов может быть очень велико.

II. Производительность ККС и оценки, определенные по средним значениям, отличаются друг от друга несущественно.

В этом случае можно говорить, что, если мы выполнили передачу данных по ККС, и повторили эту процедуру многократно, то в результате получили устойчивую тенденцию: оптимистичное время передачи пакетов данных по элементам ККС отличается друг от друга незначительно. Таким образом, можно говорить о качестве разработанной компьютерной сети.

III. Оценки при различных коэффициентах доверия существенно отличаются друг от друга.

В этом случае можно считать, что напряженные пути в разрабатываемой компьютерной сети отличаются друг от друга. Оценка времени передачи данных по элементам, лежащие на самом напряженном пути сети, имеют большие математические ожидания времени их выполнения, чем лежащие на следующем по напряжению пути, и т. д. Как и во втором случае, нет оснований считать, что разрабатываемая сеть требует существенной доработки.

Именно временные оценки, то есть ожидаемая производительность, являются одними из тех параметров модели сети, которые могут позволить оценить качество функционирования сети в целом (или по отдельным входящим в нее элементам). Конечно, необходимо в зависимости от важности, сложности или специфических требований проекта разумно выбрать соответствующий коэффициент доверия p .

Если администратор проектируемой ККС провел материальную или/и программную оптимизацию, то после завершения оптимизации и задания новых оценок продолжительностей передачи пакетированных данных необходимо вновь просчитать оценку (с тем же коэффициентом доверия p_d), а полученный результат

вновь проанализировать с точки зрения эффективности функционирования разрабатываемой ККС.

Если новый полученный проект ККС также не обеспечивает приемлемого для руководства проекта значения p_d , процедура оптимизации повторяется вновь и вновь до получения удовлетворительного результата.

После анализа результатов полученных скорректированных проектов (в случае невозможности доведения p_d до желаемого уровня) принимается одно из решений: либо увеличить материальную или/и программную обеспеченность проекта (и тем самым увеличить значение p_d), либо сохранить наилучший из проанализированных проектов, но пойти на риск неудовлетворения запросов пользователей со стороны производительности ККС. Так или иначе, после принятия окончательного решения можно зафиксировать меру гарантии – значение коэффициента доверия p_d .

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что в настоящее время аппарат статистического моделирования можно использовать как один из основных методов расчета параметров компьютерных сетей со случайными оценками времени передачи пакетированных данных по элементам ККС. Таким образом, методы имитационного моделирования, а также, связанный с ними теоретико-вероятностный аппарат являются одной из важных составных частей систем проектирования и управления ККС.

Список литературы: 1. Васильев, К. К. Математическое моделирование систем связи [Текст] / К. К. Васильев, М. Н. Служивый. // Ульяновск : УлГТУ. – 2008. – 170 с. 2. Олифер В. Г. Компьютерные сети [Текст] / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. // СПб.: Питер. – 2006. – 939 с. 3. Общие принципы построения вычислительных сетей [Электронный ресурс] // Проект разработан Шлиончак Е. Т. [2006 –]. Режим доступа: URL: <http://compnets.narod.ru/1-11.html>, свободный. 4. Смелянский Р. Л. Требования к компьютерным сетям [Текст] / Р. Л. Смелянский // М.: Издательский центр «Академия». – 2011. – 240 с. 5. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 4-е изд. [Текст] / Э. Таненбаум // – СПб.: Питер. – 2003. – 992 с. 6. Столинс В. Современные компьютерные сети [Текст] / В. Столинс // – СПб.: Питер. – 2003. – 783 с. 7. Хелд Г. Технологии передачи данных. 7-е изд [Текст] / Г. Хелд // – СПб.: Питер. – 2003. – 720 с. 8. Новиков Ю. В. Аппаратура локальных сетей: функции, выбор, разработка [Текст] / Ю. В. Новиков, Д. Г. Карпенко // – М.: Изд-во ЭКОМ. – 1998. – 288 с. 9. Чаттелл Л. А. Анализ локальных сетей NetWare [Текст] / Лаура А. Чаттелл, Дэн Е. Хейкс // Пер. с англ. – М.: ЛОРИ. – 1995. – 596 с. 10. Челлис Дж. Основы построения сетей: учеб. руководство для специалистов [Текст] / Дж. Челлис, Ч. Перкинс, М. Стриб // Пер. с англ. – М.: ЛОРИ. – 1997. – 323 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vasilev, K. K., Slugiviy, M. N. (2008) Mathematical modeling of communication systems. Ulyanovsk: UISTU, 170. 2. Olifer, V. G., Olifer, N. A. (2006). Computer Networks. SPb.: Piter, 939. 3. Shlionchak, E. T. General principles of computer networks. *Computer Networks*. < <http://compnets.narod.ru/1-11.html> > (2015, January) 4. Smelyanskiy, R. L. (2011). Requirements for computer networks. - Moscow: publishing center "Academy", 240. 5. Tanenbaum, E. (2003). Computer Networks. SPb.: Piter, 992. 6. Stolings, B. (2003). Modern computer networks. SPb.: Piter, 783. 7. Held, G. (2003). Data transmission technology. SPb.: Piter, 720. 8. Novikov, Yu. V. (1998). Equipment LANs: function selection, development. - Moscow: Publishing House of ECOM. 288. 9. Chappell, L. A., Heyks, D. E. An analysis of local NetWare Networks. - Moscow: LORI. 596. 10. Chellis, J., Perkins, C., Strib, M. Networking Basics: A Training Manual for Professionals. - Moscow: LORI. 323.

Надійшла (received) 18.12.2014

В. В. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук, доц., НМетАУ, Днепропетровск

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В СЕТИ С НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ

Статья посвящена оценке адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии, выполненной по результатам промышленного эксперимента. Описана методика проведения эксперимента. Рассчитаны среднеквадратические абсолютные и относительные ошибки прогноза. Для определения параметров динамической тепловой модели выполнено нагрев электромеханического преобразователя под нагрузкой и измерена температура обмотки последнего в этом замере и при его остывании в выключенном состоянии.

Ключевые слова: одномассовая тепловая динамическая модель, асинхронный двигатель, показатели качества электроэнергии, напряжение.

Введение. К настоящему времени накоплен богатый опыт в области исследования влияния качества электроэнергии на работу асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [1–5]. Низкое качество электроэнергии в цехах промышленных предприятий обуславливает рост прямых производственных затрат вследствие увеличения объемов ее потребления. Помимо этого, возрастают и косвенные затраты, связанные с сокращением сроков службы электрических машин.

Как известно [6], нормативный срок эксплуатации общепромышленных асинхронных двигателей составляет порядка десяти лет. Однако это соответствует только тем случаям, когда соблюдаются определенные условия. Главным из них является соответствие теплового режима электрической машины классу используемой изоляции. Снижение качества электроэнергии приводит к росту греющих потерь и, соответственно температуры изоляции. Это, в сочетании с перегрузками, приводит к существенному сокращению срока службы электродвигателей. Практика показывает, что для 40% общепромышленных АД номинальным напряжением 0,4 кВ последний составляет 1,25-2 года [7].

Цель работы. Целью работы является проверка адекватности тепловой динамической модели асинхронного двигателя, работающего в сети с некачественной электроэнергией.

Материал и результаты исследований. Для исследования влияния режимов работы электродвигателя на его температурное состояние применяются т. н. тепловые модели [8,9]. Они представляют собой схему замещения, источниками тепла в которой служат электрические потери, в узлах находятся температуры конструктивных элементов, а между ними лежат соответствующие тепловые проводимости и емкости. Рассматриваемые модели имеют разную степень детализации. Наиболее простой является одномассовая модель, в которой электромеханический преобразователь представляется как единое однородное тело с общей температурой. Хотя в действительности присутствует неоднородность распределения температур: температура изоляции обмотки статора АД может превышать температуру корпуса на 15-20°C [10].

© В. В. КУЗНЕЦОВ, 2014

Более детальные модели имеют меньшую погрешность прогноза, однако для этого необходимы дополнительные данные о тепловых проводимостях и емкостях отдельных конструктивных элементов двигателя. Такие модели применяются, как правило, только на стадии проектирования. Кроме того, при использовании последних рассматривается установившееся тепловое состояние без учета его динамики.

На наш взгляд, в условиях эксплуатации наиболее целесообразно использование одностепенной динамической тепловой модели, причем в качестве ее выходного параметра необходимо рассматривать температуру критического по нагреву элемента АД – лобовых частей обмоток статора. Как известно, они находятся в наихудших по охлаждению условиях, поскольку их теплоотдача, главным образом, осуществляется через воздух.

Одностепенная динамическая тепловая модель АД описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\Delta P = A \cdot \tau + \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \cdot C, \quad (1)$$

где ΔP – мощность греющих потерь, выделяющихся в электродвигателе; τ – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды; $\Delta \tau$ – приращение температуры двигателя, произошедшее за время Δt ; A – коэффициент теплоотдачи, Дж/(сек·С) (равен количеству тепла, отдаваемому в окружающую среду за 1 секунду при разнице указанных температур $\tau = 1$ °С); C – теплоемкость двигателя, Дж/°С. Указанная теплоемкость равна количеству тепла, необходимого для нагрева АД на 1 °С при отсутствии теплоотдачи в окружающую среду.

Как видно, в уравнении теплового баланса (1) имеются две неизвестные величины – A и C , которые могут быть найдены по экспериментальным данным путем составления системы уравнений относительно неизвестных. При этом повышение точности определения коэффициента теплоотдачи и теплоемкости двигателя достигается за счет использования сумм измеренных параметров в нескольких опытах:

$$\begin{cases} \frac{\sum \Delta P}{N} = A \cdot \sum \tau + \sum \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \cdot C \\ \frac{\sum \Delta P \cdot \tau}{N} = A \cdot \sum \tau^2 + \sum \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \cdot \tau \cdot C \end{cases} \quad (2)$$

Соответствующие эксперименты проведены в условиях экспериментального цеха ООО «Укрспецсервис». В качестве исследуемого рассмотрен асинхронный двигатель типа 4АХ80А4У3 (номинальные параметры: $U_H=220/380$ В (Δ/У), $P_H=1,1$ кВт, $n_H=1400$ об/мин, $I_H=4,8/2,8$ А, $\eta=75\%$, $\cos \varphi=0,81$). Двигатель нагружен на генератор постоянного тока типа ПЗ1У4 (номинальные параметры $U_H=230$ В, $P_H=1,0$ кВт, $n_H=1450$ об/мин, $I_H=4,3$ А, $\eta=75\%$). В процессе опытов АД нагревался при работе под номинальной нагрузкой, а остывал при невращающемся роторе.

В крышке двигателя было сделано отверстие для определения температуры лобовых частей обмоток с помощью лазерного пирометра типа Fluke 568. Отверстие открывалось только на короткий период для проведения измерений (5 сек), при работе электродвигателя отверстие закрывалось для предупреждения теплообмена между внутренним и внешним воздухом. Токи и напряжения регистрировались с помощью мобильного измерительно-диагностического

комплекса на базе датчиков тока типа LA 25A, датчиков напряжения LV100P (производство фирмы LEM, Швейцария) и АЦП E-440 (L-CARD, Россия), характеристики измерительных каналов представлены в табл. 1.

Таблица 1– Характеристики измерительных каналов мобильного измерительно-диагностического комплекса

Компонент	Характеристики
АЦП	
ТИП	E-440
Количество каналов	16 дифференциальных
Разрядность	12 бит
Время преобразования	1,7 мкс
Диапазон входного сигнала	$\pm 5,12\text{В}; \pm 2,56\text{В}; \pm 1,024\text{В};$
Максимальная частота переобразования	200 кГц
Смещение нуля	$\pm 0,5\text{МЗР};$ макс 1МЗР.
Датчик напряжения	
ТИП	LV-400
Диапазон входного сигнала	0 – 500 В
Диапазон выходного сигнала	0 – 10 В
Максимальная статическая ошибка	0,015%
Максимальная динамическая погрешность	0,03%
Датчик тока	
ТИП	LA-100С
Диапазон входного сигнала	0 – 250 А
Диапазон выходного сигнала	0 – 10 В
Максимальная статическая ошибка	0,03%
Максимальная динамическая погрешность	0,08%

Для устранения погрешности опыта, обусловленной повышенным нагревом в ходе пуска, испытуемый электродвигатель разогнан с помощью нагрузочной машины, работающей в двигательном режиме. Только по достижении установкой скорости холостого хода, на асинхронный двигатель подано напряжение питания, а нагрузочная машина переведена в режим динамического торможения (рис. 1).

В табл. 2 представлены результаты эксперимента нагрева исследуемого двигателя при идеальном питающем напряжении.

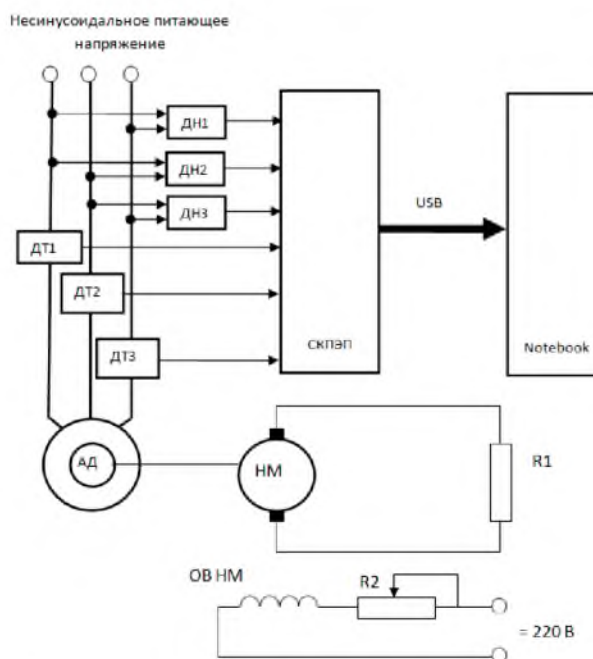


Рис. 1 – Схема опыта по проверке адекватности тепловой модели асинхронного двигателя: ИМ, НМ – испытуемая и нагрузочная машина; СКПЭП – система контроля параметров электропривода (измерительный комплекс); ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Таблица 2 – Результаты опыта №1, идеальное питающее напряжение

Время, сек	Действительное значение температуры, °С	Прогнозируемое по модели значение температуры, °С	Абсолютная погрешность, °С
0	0,0	0	0
120	5,4	6	1
240	10,4	12	1
360	12,0	17	5
480	14,7	21	6
600	26,1	25	-1
720	28,7	28	0
840	34,7	31	-3
960	37,6	34	-3
1080	40,1	37	-3
1200	43,4	39	-5
1320	45,0	41	-4
1440	46,7	42	-4
1560	47,7	44	-4
1680	48,7	45	-3
1800	50,0	47	-3
1920	50,0	48	-2
Установившееся значение	75,7	73	-2

На рис. 2 показана экспериментально полученная кривая нагрева исследуемого двигателя при идеальном питающем напряжении.

За время порядка 62 минут температура двигателя достигла установившегося значения 76,3°С. По результатам опыта составлена система уравнений (2) и произведен расчет параметров одномассовой тепловой модели. Они составили: – коэффициент теплоотдачи двигателя при вращении $A=11,2$ Дж/(сек×°С), – теплоемкость электродвигателя $C – 12,1$ кДж/°С.

Учитывая, что в справочной литературе имеются крайне скудные данные о тепловых параметрах электрических машин (как правило, приводятся только тепловые постоянные времени для двигателей отдельных классов и диапазонов мощностей) рассмотренный способ их определения в процессе идентификации модели конкретного АД является достаточно актуальным.

Далее были проведены опыты нагрева при разной степени искажения напряжения питания электродвигателя, результаты которых представлены в табл. 3 и табл. 4.

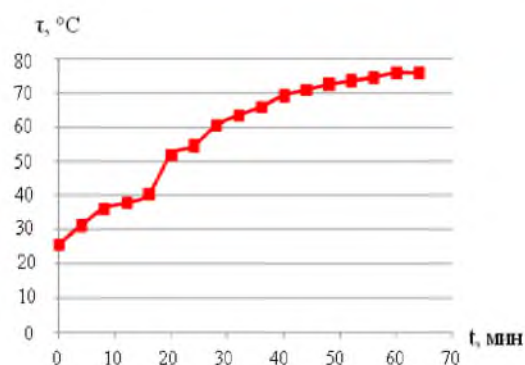


Рис. 2 – Кривая нагрева двигателя при работе под номинальной нагрузкой и идеальной форме питающего напряжения

Таблица 3– Результаты опыта №2, искаженное питающее напряжение

Время, сек	Действительное значение температуры, °С	Прогнозируемое по модели значение температуры, °С	Абсолютная погрешность, °С
0	0,0	0	0,0
120	12,0	12	0,1
240	23,1	21	1,7
360	30,8	29	1,6
480	33,9	36	-1,7
600	38,7	41	-2,0
720	44,0	45	-0,8
840	44,3	48	-3,9
960	52,0	51	1,0
1080	54,1	53	0,9
1200	54,4	55	-0,6
1320	56,4	56	0,0
1440	56,2	58	-1,4
1560	58,1	59	-0,5
1680	62,0	59	2,6
1800	58,9	60	-1,1
1920	61,2	61	0,6
Установившееся значение	86,0	86	0,0

Таблица 4 – Результаты опыта №3, искаженное питающее напряжение

Время, сек	Действительное значение температуры, °С	Прогнозируемое по модели значение температуры, °С	Абсолютная погрешность, °С
0	0,0	0	0,0
120	13,8	13	0,6
240	21,9	24	-2,1
360	34,1	33	1,5
480	37,8	40	-1,9
600	46,9	45	1,5
720	47,9	50	-2,1
840	55,5	54	1,7
960	55,3	57	-1,6
1080	60,3	59	0,9
1200	61,1	61	-0,2
1320	64,3	63	1,4
1440	65,5	64	1,2
1560	62,8	65	-2,6
1680	62,8	66	-3,4
1800	69,7	67	2,8
1920	68,1	68	0,6
Установившееся значение	93,0	93	0,0

Последующие опыты №2–4 проведены при различной степени искажения питания электродвигателя. Показатели качества последнего (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения k_U , коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности ε_2) приведены в табл. 5.

Таблица 5– Показатели качества электроэнергии в опытах и установившееся значение температуры обмотки АД

№ опыта	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения k_U , %	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности ε_2 , %	Установившаяся абсолютная температура, $\tau^{\circ}\text{C}$
1	0	0	76,3
2	0	4	85,1
3	8	0	92,5
4	13,0	0	117,8

Опыт №4 соответствует работе двигателя с температурой, превышающей допустимую для данного класса изоляции $F(105^{\circ}\text{C})$ и нахождение АД в таком состоянии может быть только кратковременным, т.к. возможен тепловой пробой его обмоток.

Рассмотренные опыты использованы для проверки адекватности предложенной в работе динамической тепловой модели АД. На рис. 3–8 сопоставлены графики превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды в этих опытах нагрева с расчетными кривыми, полученными с помощью электромеханической [11] и тепловой моделью асинхронного двигателя [12]. Здесь так же приведены осциллограммы напряжений и токов соответствующих опытов. Исходными

здесь являются значения параметров модели АД и кривая питающего напряжения произвольной формы, по которым и рассчитывается мгновенная мощность АД. Последняя, в свою очередь, участвует в расчете уровня потерь. Величина же потерь служит входным параметром тепловой динамической модели АД, адекватность которой и проверяется.

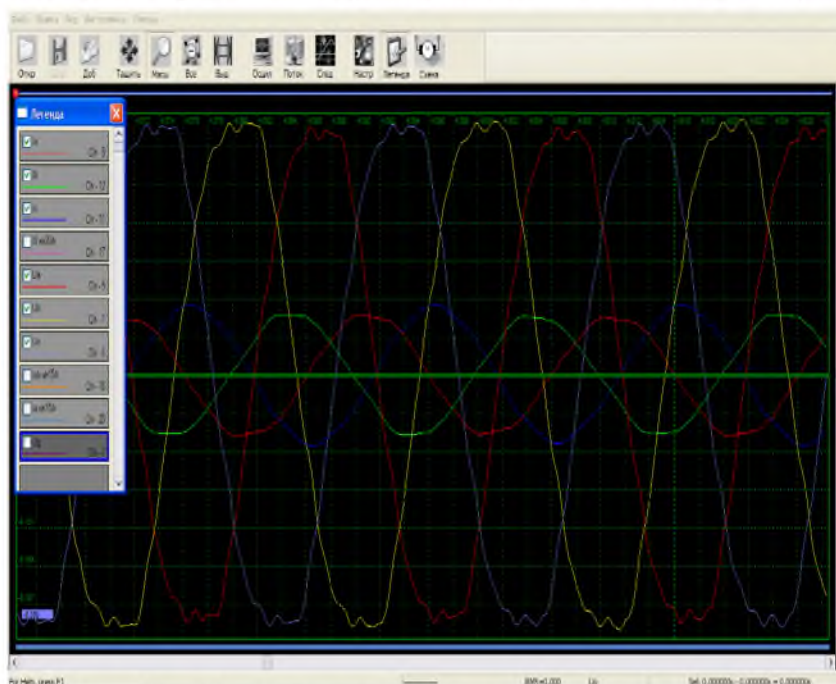


Рис. 3 – Осциллограммы напряжений и токов ($k_U = 6\%$, $\varepsilon_2 = 4\%$) в опыте № 2

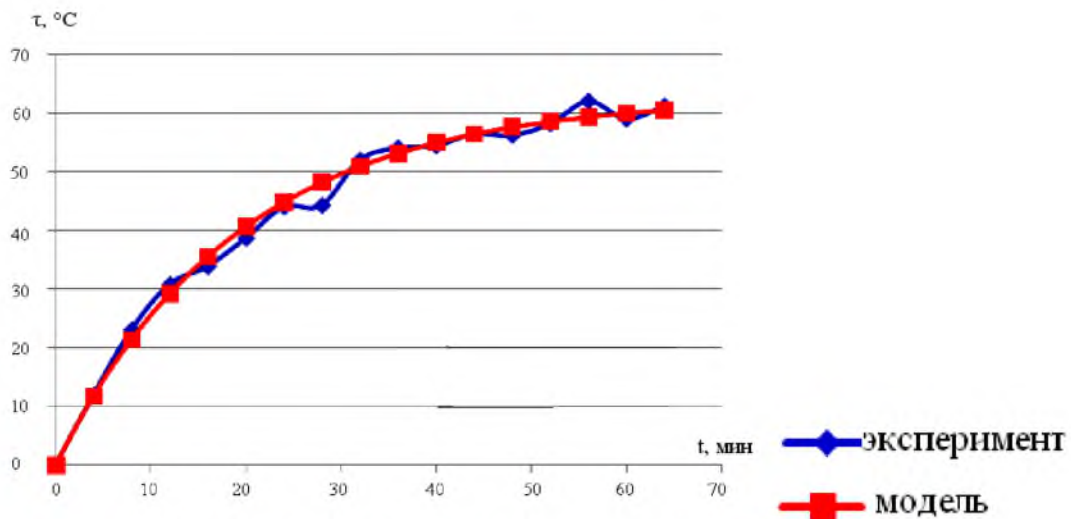


Рис. 4 – Кривые нагрева двигателя в опыте № 2

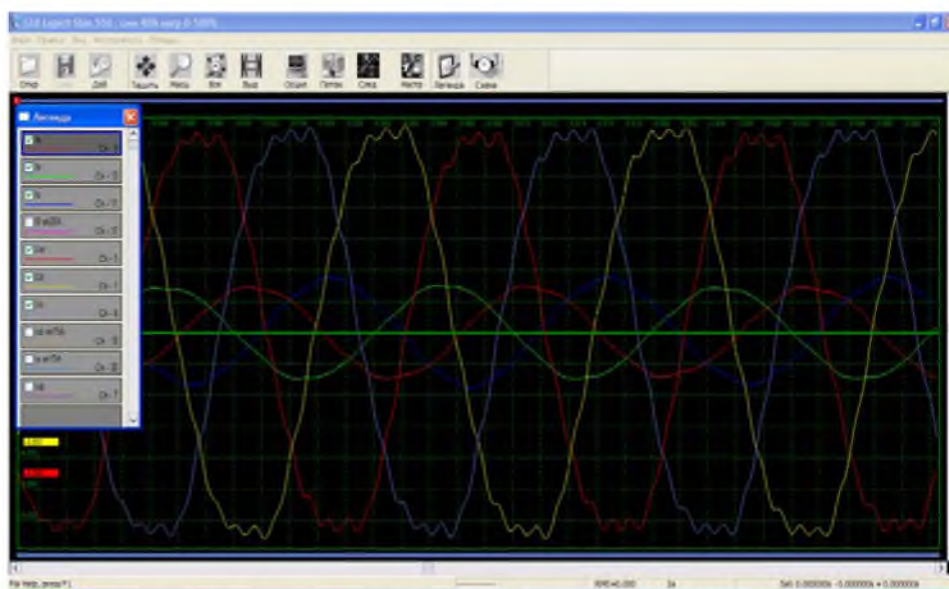


Рис. 5 – Осциллограммы напряжений и токов ($k_U = 8\%$, $\varepsilon_2 = 4\%$) в опыте № 3

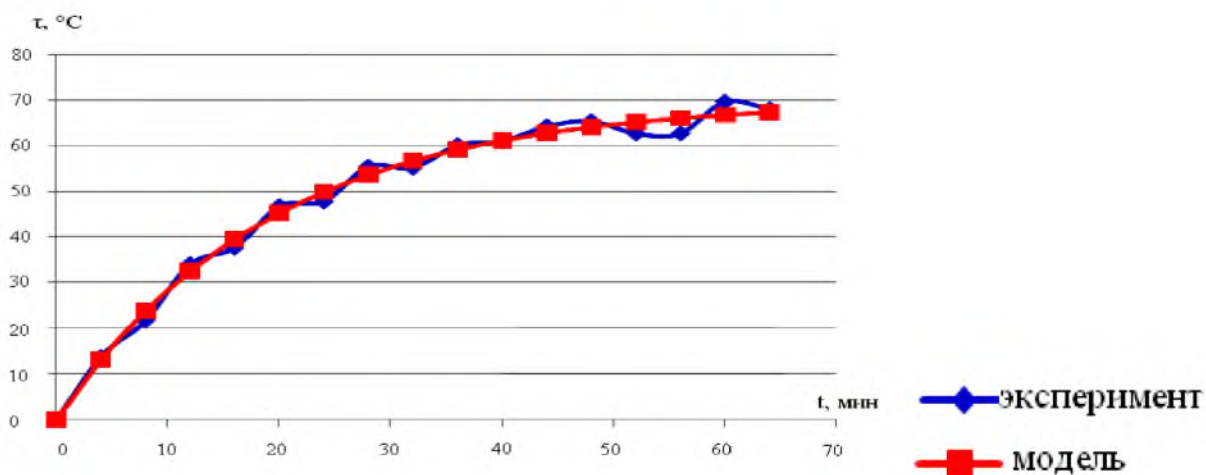


Рис. 6 – Кривые нагрева двигателя в опыте № 3

Далее был произведен расчет погрешности прогнозируемого значения температуры в динамике нагрева. На рис. 9 показаны экспериментальные и расчетные (прогнозируемые) значения температуры для всех проведенных опытов, которые и использовались для проверки адекватности модели по методу, изложенному в [13–15]. Здесь различный формат маркеров относится к соответствующим опытам.

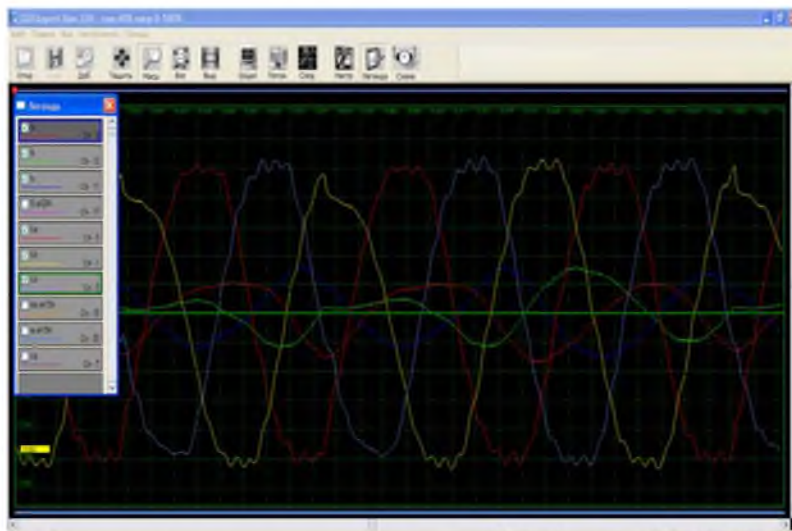


Рис. 7 – Осциллограммы напряжений и токов ($k_U = 13\%$, $\varepsilon_2 = 6\%$) в опыте № 4

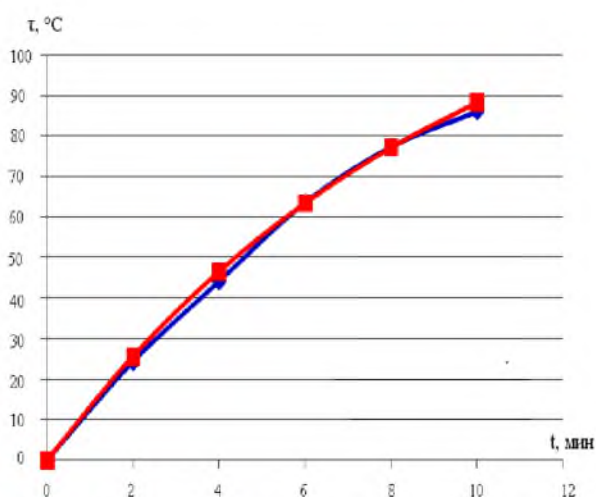


Рис. 8 – Кривые нагрева двигателя в опыте № 4:
 —♦— эксперимент
 —■— модель

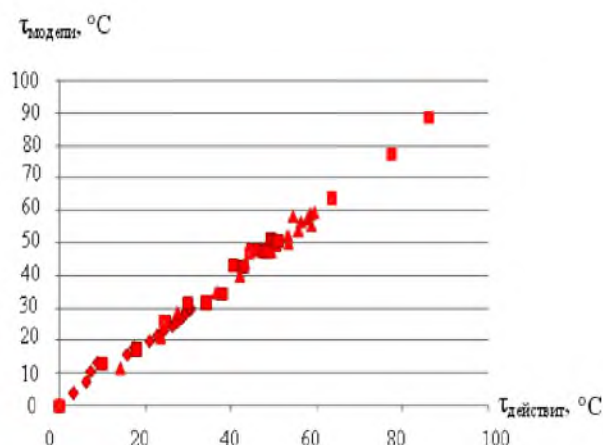


Рис. 9 – Взаимосвязь прогнозируемых τ_M и экспериментальных τ_D значений превышения температуры обмотки АД

Проведенная проверка адекватности предполагает получение следующего уравнения линейной регрессии

$$Y_n^* = a_0 + a_1 Y_D \quad (3)$$

где

$$a_0 = \bar{Y}_n - r_{Y_D Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_D} \bar{Y}_D; \quad a_1 = r_{Y_D Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_D}. \quad (4)$$

Здесь \bar{Y}_n, \bar{Y}_D – средние значения прогнозируемых и действительных величин; $r_{Y_D Y_n}$ – коэффициент корреляции между ними; $\sigma_{Y_n}, \sigma_{Y_D}$ – среднеквадратичные отклонения.

Указанные параметры вычислялись по формулам:

$$r_{Y_D Y_n} = \frac{\sum_{i=1}^L (Y_{D_i} - \bar{Y}_D)(Y_{n_i} - \bar{Y}_n)}{L \sigma_{Y_D} \sigma_{Y_n}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{Y_{\delta}} = \sqrt{\sum_1^L (Y_{\delta} - \bar{Y}_{\delta})^2 / (L-1)}, \quad (6)$$

$$\sigma_{Y_n} = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - \bar{Y}_n)^2 / (L-1)} \quad (7)$$

где $L=57$ объем статистической выборки (количество замеров температуры во всех опытах).

Среднеквадратическая абсолютная ошибка измерений определялась как:

$$\Delta Y_n = t_p \sigma_{Y_n}^*, \quad (8)$$

где t_p – коэффициент Стьюдента для заданной надежности и числа степеней свободы $k = L - 1$. В рассматриваемом случае надежность принималась $p = 0,05$. Здесь $\sigma_{Y_n}^*$ – остаточное среднеквадратичное отклонение, вычисляемое по формуле:

$$\sigma_{Y_n}^* = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - Y_n^*)^2 / (L-1)}. \quad (9)$$

Среднеквадратическая относительная ошибка прогноза определялась следующим образом:

$$\delta_{Y_n} = |\Delta Y_n| / Y_{n\max} 100\%, \quad (10)$$

где $Y_{n\max}$ – наибольшее значение прогнозируемой величины.

Полученные в результате значения: $\sigma_{Y_{\delta}} = 21,2^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{Y_{\Pi}} = 20,9^{\circ}\text{C}$, $\Gamma_{Y_{\delta}Y_{\Pi}} = 0,99$, $\sigma_{Y_n}^* = 2,34^{\circ}\text{C}$, $\Delta Y_n = 0,28^{\circ}\text{C}$, $\delta_{Y_n} = 3,2\%$.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности предложенной тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в сетях с некачественной электрической энергией. Учитывая, что для многих типов двигателей в справочной литературе отсутствуют сведения о коэффициентах теплоотдачи и теплоемкости, а по отдельным приводятся только тепловые постоянные времени, значения указанных параметров модели могут быть получены по использованной в статье методике.

Список литературы: 1. Жежеленко, И. В. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с. 2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК. – М.: Издательство стандартов. – 1998. – 15 с. 3. Родькин, Д. И. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах [Текст] / Д. И. Родькин, А. П. Черный, В. А. Мартыненко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – Вип.1. – 2002. – С.81-85. 4. Луговой, А. В. Вопросы практического энергосбережения промышленных предприятий [Текст] / А. В. Луговой, А. П. Черный // Вісник КДПУ. – 1998. – Випуск 1(4). – С.73-77. 5. Зиновкин, В. В. Моделирование добавочных потерь в электрооборудовании системы электротехнического комплекса при несинусоидальных токах [Текст] / В. В. Зиновкин // Вісник КДПУ. – Випуск 4/2007(45). – С. 49-52. 6. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 340 с. 7. Чорний, О. П. Теорія і практика моніторингу параметрів електричних двигунів електромеханічних систем: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 / О. П. Чорний. – Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т., 2004. – 32 с. 8. Борисенко, А. И. Охлаждение промышленных электрических машин [Текст] / А. И. Борисенко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 212 с. 9. Проектирование электрических машин [Текст] / Под ред.

И. П. Копылова – М.: Энергия, 1980. – 326 с. **10.** *Рыжков, А. А.* Определение параметров тепловой схемы замещения асинхронного двигателя на базе экспериментальных данных [Текст] / *А. А. Рыжков.* – Проблемы автоматизированного электропривода: теория и практика: сб. науч. тр. Днепродзерж. гос. техн. ун-та (техн. науки): темат. вып. — Днепродзержинск, 2007. – 156 с. **11.** *Качан, Ю. Г.* Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания [Текст] / *Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов* // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – № 3. – Кременчук, 2009. – С.56-58. **12.** *Качан, Ю. Г.* Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии [Текст] / *Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов* // Гірни. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Вип. 85. – Дніпропетровськ, 2010. – С.113-118. **13.** *Адлер, Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / *Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский.* – М.: Наука, 1976. – 183 с. **14.** *Ивоботенко, Б. А.* Планирование эксперимента в электромеханике [Текст] / *Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов.* – М.: Энергия, 1975. – 184 с. **15.** *Корн, Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / *Г. Корн, Е. Корн.* – М.: Наука, 1984. – 186 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Zhezhelenko, I. V.* (1996). Voprosy kachestva jelektrojenergii v jelektroustanovkah. Mariupol': PGТУ,173. **2.** GOST 13109-97 (1998). Normy kachestva jelektricheskoy jenergii v sistemah jelektronsabzhenija obshhego naznacheniya. IPK. - Moscow: Izdatel'stvo standartov, 15. **3.** *Rod'kin, D. I.* (2002). Obosnovanie kriteriev kachestva preobrazovanija jenergii v jelektromehanicheskikh sistemah. Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu. Kremenchuk: KDPU, Vip.1, 81-85. **4.** *Lugovoj, A. V.* (1998). Voprosy prakticheskogo jenergosberezhenija promyshlennyh predpriyatij. Visnik KDPU, Vipusk 1(4), 73-77. **5.** *Zinovkin, V. V.* (2007). Modelirovanie dobavochnyh poter' v jelektrouoborudovanii sistemy jelektrotehnicheskogo kompleksa pri nesinusoidal'nyh tokah. Visnik KDPU, Vipusk 4, 49-52. **6.** *Zhezhelenko, I. V.* (2000). Vysshie garmoniki v sistemah jelektronsabzhenija prompredpriyatij. – Moscow: Jenergoatomizdat, 340. **7.** *Chornij, O. P.* (2004). Teorija i praktika monitoringu parametriv elektrichnih dviguniv elektromechanichnih sistem: Avtoref. dis. d-ra tehn. nauk: 05.09.03. – Dnipropetrovs'k: Nac. girn. un-t., 32. **8.** *Borisenko, A. I.* (1983). Ohlazhdenie promyshlennyh jelektricheskikh mashin. - Moscow: Jenergoatomizdat, 212. **9.** Proektirovanie jelektricheskikh mashin.(1980). Pod red. I. P.Kopylova. - Moscow: Jenergija, 326. **10.** *Ryzhkov, A. A.* (2007). Opredelenie parametrov teplovoj shemy zameshhenija asinhronnogo dvigatelja na baze jeksperimental'nyh dannyh.Problemy avtomatizirovannogo jelektrouprivoda: teorija i praktika: sb. nauch. tr. Dneprodzерж. gos. tehn. un-ta (tehn. nauki): temat. vyp. — Dneprodzержinsk, 156. **11.** *Kachan, Ju. G.* (2009). Realizacija modeli asinhronnogo dvigatelja dlja uslovij nekachestvennogo pitaniya. Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu, 3. – Kremenchuk, 56-58. **12.** *Kachan, Ju. G.* (2010). Teplovaja sostavljajushhaja jekonomicheskogo ushherba ot raboty asinhronnogo dvigatelja v uslovijah nekachestvennoj jelektrojenergii. Girn. elektromechanika ta avtomatika: nauk.-tehn. Zb., Vip. 85. – Dnipropetrovs'k,113-118. **13.** *Adler, Ju. P.* (1976) Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij. - Moscow: Nauka, 183. **14.** *Ivobotenko, B. A.* (1975). Planirovanie jeksperimenta v jelektromehanike. - Moscow: Jenergija, 184. **15.** *Korn, G.* (1984). Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov. - Moscow: Nauka, 186.

Надійшла (received) 11.12.2014

УДК 661.321

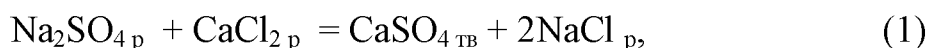
Д. В. ФИЛОНЕНКО, соискатель, НТУ «ХПИ»;
В. Ф. РАЙКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
А. В. ШЕСТОПАЛОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

СНИЖЕНИЕ ИНКРУСТАЦИИ ДИСТИЛЛЕРА ПУТЕМ СНЯТИЯ ПЕРЕСЫЩЕНИЯ ПО СУЛЬФАТУ В РЕАКТОРЕ-СМЕСИТЕЛЕ ОТДЕЛЕНИЯ ДИСТИЛЛЯЦИИ

В статье рассмотрены причины сульфатной инкрустации отделения дистилляции содового производства. Исследованы пути снижения кристаллизации ангидрита на поверхности дистиллера и трубопроводов. Установлено, что с повышением температуры и концентрации ангидритной затравки скорость кристаллизации сульфата кальция возрастает. Отгонка части аммиака и воды непосредственно в смесителе на барботажных тарелках также способствует кристаллизации ангидрита и ускоряет процесс снятия пересыщения по гипсу.

Ключевые слова: инкрустация аппаратуры, реактор-смеситель, производство соды, дистиллер, кристаллизация ангидрита.

Введение. В содовом производстве отделении дистилляции служит для регенерация аммиака из фильтровой и других жидкостей. Обычно часть растворенного аммиака связана с диоксидом углерода, поэтому при разложении карбонатных солей аммония известковым молоком и его карбоната вместе с аммиаком отгоняется и возвращается в производство диоксид углерода [1]. В процессе разложения связанного аммиака в объеме реакционной зоны реактора-смесителя, из-за наличие сульфат-иона, образовавшегося в процессе предварительной очистки рассола от $MgSO_4$ [2, 3], имеет также место необратимая реакция образования малорастворимого сульфата кальция по реакции (1)



кристаллизирующегося на стенках смесителя, дистиллера и «беломорских» трубопроводов в виде метастабильных модификаций $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и α - $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$, β - $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$, α - $CaSO_4$; β - $CaSO_4$ переходящих в стабильную модификацию-ангидрит γ - $CaSO_4$ [4–6]. В результате этого дистиллер содового производства в процессе эксплуатации зарастает инкрустациями, что приводит к снижению производительности станции дистилляции и вынуждает останавливать аппарат для чистки, которая производится обычно через 30 – 60 суток.

Эффективным методом предупреждения выпадения сульфатных инкрустаций в дистиллере является снятие пересыщения по сульфату в реакторе-смесителе. Поэтому, несмотря на то, что реакция между $Ca(OH)_2$ и NH_4Cl проходит достаточно быстро – в течение от 3–5 мин. с целью ликвидации пересыщения раствора по $CaSO_4$ и увеличения срока работы дистиллера между чистками пребывание жидкости в смесителе увеличивают до 30–40 мин, что и определяет объем аппарата.

Таким образом, разработка усовершенствованной конструкции реактора смесителя, способствующей быстрому снятию пересыщения по сульфату кальция является перспективным направлением в усовершенствовании технологической схемы отделения дистилляции.

Цель работы. Целью работы является исследование путей снятия пересыщения по сульфат-иону в реакторе-смесителе отделения дистилляции содового производства и разработка рекомендаций по усовершенствованию конструкции промышленного смесителя.

Анализ литературных данных. Литературный обзор работ по вопросу механизма образования гипсовых инкрустаций в аппаратуре дистилляции содового производства показывает, что данной проблеме исследователи уделили много внимания и были предложены некоторые рекомендации по снижению инкрустаций. Так, причиной отложения ангидритных инкрустаций в дистиллере является образование полугидрата сульфата кальция и последующее превращение его в ангидрит. Одной из причин выпадения сульфата кальция в дистиллере является резкое понижения растворимости CaSO_4 , обусловленного повышением концентрации CaCl и ростом температуры [7, 8]. Главными компонентами инкрустаций являются ангидрит и в виде примеси (до 5 %) кальцит.

При разных температурах сульфат кальция кристаллизуется в различной форме: в виде безводной соли CaSO_4 , полуводной $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ и двухводного гидрата $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Растворимость гипса в воде показана на рис. 1 [2, 9]. При температурах ниже 97°C сульфат кальция кристаллизуется в виде двухводной соли $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, выше 97°C - в виде $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$. В присутствии NaCl и CaCl_2 температура кристаллизации $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ снижается от 97 до $93-95^\circ\text{C}$.

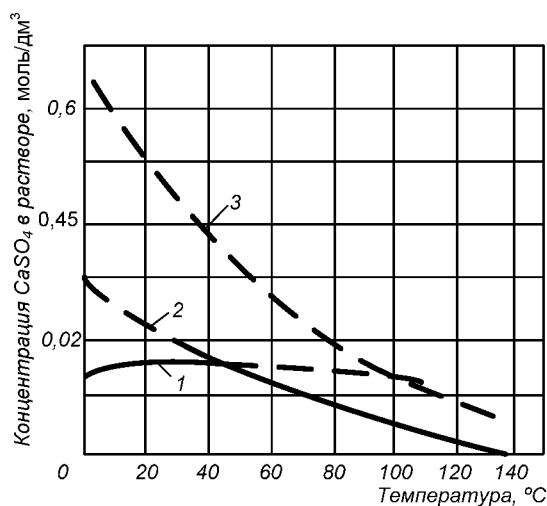


Рис. 1 – Растворимость гипса в воде: 1 – для $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 2 – для CaSO_4 ; 3 – для $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$

Выпадающий при температуре ниже критической (93°C) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ при повышении температуры выше критической переходит в полуводный, растворимость которого при увеличении температуры снижается. Этот процесс перекристаллизации способствует отложению твердой соли на внутренних поверхностях аппаратов. Известно, что новые кристаллические зародыши легче образуются на твердой поверхности, чем в объеме раствора. Поэтому гипс откладывается на поверхностях аппаратов особенно интенсивно в процессе образования новых кристаллов или при переходе одной модификации кристаллов в другую.

Экспериментальные данные Дрозина Н.Н. показали, что одной из причин образования инкрустаций внизу дистиллера, при наличии в дистиллерной суспензии двуводрата сульфата кальция, может быть кристаллизация полугидрата

с последующим превращением его в ангидрит. Было установлено [10], что кристаллизация метастабильных модификаций сульфата кальция имеет место из-за пересыщенных растворов относительно этих модификаций.

Экспериментальные работы Зеликина М.Б. [11], Громовой Е.Т. [12] показывают, что за 20-30 минут концентрация иона SO_4^{2-} в жидкости смесителя успевают стабилизироваться. Ввод кристаллической прокладки сульфата кальция или карбоната кальция, а также повышение температуры в растворе позволяют существенно снизить время кристаллизации гипса и почти полностью предупреждает образование пересыщения. Кроме того, в литературе указывается на существенное значение способа подачи реагентов в реактор-смеситель. В случае быстрого переливания и смешивания известкового молока с жидкостью теплообменника появляется большое число центров кристаллизации гипса, что приводит к резкому увеличению поверхности кристаллизации и ускоряет процесс снятия пересыщения по SO_4^{2-} . Увеличение центров кристаллизации в объеме смесителя также можно достигнуть, путем создания карбонатного режима путем введения в смеситель иона CO_3^{2-} , который с известковым молоком образует дополнительно свежесажженный CaCO_3 . При этом сульфат кальция соосаждается с карбонатом кальция в объеме жидкости и предотвращает инкрустацию аппаратуры [13, 14].

Другим способом снятия пересыщения является создание безинкрустационного процесса при повышенных температурах [15]. В исследованиях Михайловой Е. Н. показано, что начиная с температуры 152°C и выше происходит резкое снятие пересыщения без ангидритной подкладки. При температурах $154 - 158^\circ\text{C}$ устанавливается практически постоянная концентрация CaSO_4 в дистиллерной жидкости $0,005$ моль/дм³ [16], не приводящая к инкрустации аппаратуры. Но такой температурный режим требует значительного расхода пара [15].

Исследования Громовой Е. Т. [12] показывают, что в присутствии $0,05$ моль/дм³ ангидритной прокладки и температуры 115°C , время превращения полугидрата в ангидрит составляет около 5 минут. При повышении температуры выше 115°C позволит уменьшить концентрацию ангидритной подкладки в такой степени, что процесс кристаллизации будет происходить в присутствии следов ангидритных кристаллов. Осуществление способа образования стабильной фазы – ангидрита в потоке жидкости смесителя при температуре более 120°C позволило бы иметь циркуляционный поток в 4–5 раз меньше по сравнению со способом ангидритной прокладки.

Осуществление необходимого температурного режима возможно с помощью струйных жидкостно-паровых инжекторов, в которых конденсация инжектируемого пара на струе воды протекает весьма интенсивно. Так, коэффициент теплопередачи от концентрируемого пара к струе жидкости, отнесенный к поверхности цилиндрической струи составляет величину около 10^6 ккал/м²·час $^\circ\text{C}$ [17]. Следует дополнительно отметить достоинство струйных подогревателей, как малогабаритных в конструктивном отношении, а также простых в изготовлении и обслуживании.

Методика исследования образования гипсовых инкрустаций. С целью изучения роли двугидрата сульфата кальция в образовании инкрустаций на

стенках дистиллера, а также разработке рекомендаций эффективного снятия пересыщения в смесителе, изучалось превращение двугидрата сульфата кальция в полугидрат при различных температурах в дистиллерной жидкости и синтетической жидкости реактора-смесителя.

В качестве реактива применяли двугидрат сульфата кальция, полученный путем приливания по каплям 5% раствора CaSO_4 к жидкости, содержащей CaCl_2 . Смешение производили при температуре 84° . Полученный осадок $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ отмывали от маточного раствора водой и спиртом. Кристаллы $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ имели размеры от 30 до 300 мкм. Количество кристаллов длиной менее 30 мкм составляло 3%. Для опытов пользовались синтезированной дистиллерной жидкостью, содержащей $0,01$ моль/дм³ SO_4^{2-} и $1,75$ моль/дм³ Cl^- . Растворение солей при приготовлении дистиллерной жидкости производили в следующем порядке. Вначале растворяли сульфат натрия, затем к полученному раствору добавляли поваренную соль. В отдельном стакане растворяли хлорид кальция. Затем раствор его вливали в смешанный раствор сульфата натрия и поваренной соли и доводили до метки в мерной колбе дистиллированной водой. Следует отметить, что при введении навески сульфата натрия в смешанный раствор хлоридов кальция и натрия выпадал осадок; содержание SO_4^{2-} в растворе оставалось ниже $0,01$ моль/дм³. Лабораторная установка для проведения опытов состояла из реакционной толстостенной колбы емкостью 1 л снабженной пробкой, в которую были вмонтированы термометр, загрузочное приспособление, трубка с присоединенным к ней ртутным манометром, трубка для отбора проб суспензии и мешалка с сальниковым уплотнением. Дистиллерную жидкость заливали в реакционную колбу так, чтобы не оставалось воздушных пузырей. Колбу закрывали герметично пробкой, погружали в глицериновый термостат с заданной температурой и отбирали часть раствора для того, чтобы ввести навеску гипса и создать объем для парогазовой фазы. По достижении заданной температуры в реакционную колбу вводили навеску гипса при помощи загрузочного устройства. Пробы после внесения навески отбирали через 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 и 120 мин. Твердую фазу отделяли с помощью стеклянного фильтра, промывали ее этиловым спиртом, затем высушивали между листами фильтровальной бумаги и анализировали химическим и кристаллооптическим методами. Фильтрат охлаждали до температуры 20° , немедленно отбирали в пипетку и во взятой пробе определяли SO_4^{2-} , Cl^- и прямой титр. Помутнения фильтрата или выпадения в нем осадка не наблюдалось.

Обсуждение результатов исследования образования сульфатов и их кристаллизации. Экспериментальные исследования, проведенные в лабораторных условиях, с использованием синтетической жидкости смесителя (без твердой фазы) с концентрацией SO_4^{2-} , равной $0,00975 - 0,01025$ моль/дм³ показали, что если выдерживать ее при температуре 90° около 2 часов или удалить из нее часть аммиака и воды ($92 - 98^\circ$), то в выделяющемся при этом осадке будет содержаться ангидрит. Основываясь на проведенных опытах, можно ожидать появления ангидритных инкрустаций в условиях, когда дистиллерная жидкость имеет температуру порядка $95 - 100^\circ\text{C}$. Было установлено, что скорость кристаллизации ангидрита резко возрастает с повышением температуры и содержания SO_4^{2-} в дистиллерной жидкости и не изменяется с увеличением

скорости движения жидкости относительно поверхности, на которой происходит осаждение. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Прямые 1 и 1' дают зависимость скорости кристаллизации ангидрита от температуры при постоянной концентрации SO_4^{2-} в растворе; кривая 2 показывает изменение скорости кристаллизации ангидрита при температуре 102° в зависимости от концентрации SO_4^{2-} в дистиллерной жидкости от изменяющейся в пределах 0,00875 до 0,0095 моль/дм³; прямая 3 указывает на отсутствие зависимости скорости кристаллизации ангидрита при температуре $102,5^\circ\text{C}$ и постоянном содержании SO_4^{2-} , равном 0,0095 моль/дм³, от изменения скорости движения жидкости в пределах 0,3 до 0,8 м/сек.

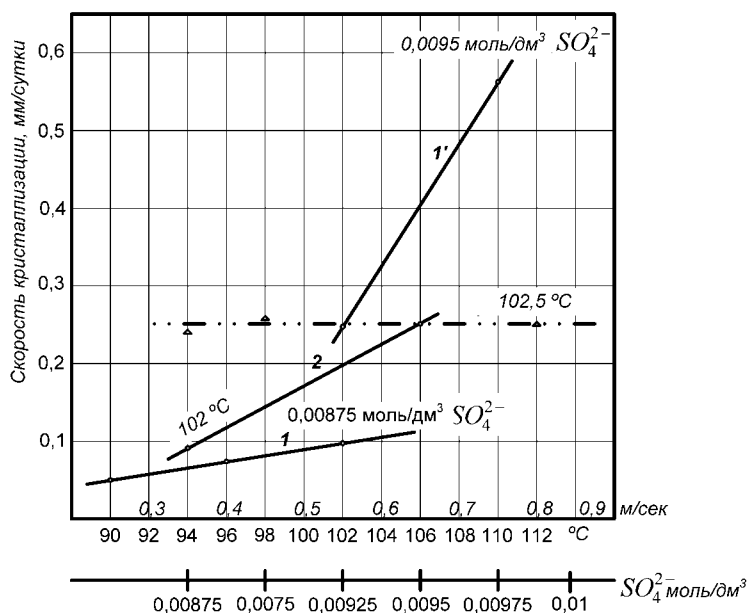


Рис. 2 – Результаты экспериментального исследования инкрустации: кривая 1 – скорость кристаллизации ангидрита в зависимости от температуры; кривая 2 – концентрации CaSO_4 в растворе; кривая 3 – скорости движения жидкости

Скорость кристаллизации характеризуется скоростью прироста толщины слоя инкрустаций. При концентрации SO_4^{2-} , равной 0,0095 моль/дм³ и температуре 110° скорость кристаллизации ангидрита составляет 0,56 мм/сутки и снижается до 0,25 мм/сутки при понижении температуры до 102° . Уменьшение концентрации SO_4^{2-} в растворе при той же температуре до 0,0085 моль/дм³ приводит к понижению скорости осаждения ангидрита до 0,08 мм/сутки, а понижение температуры до 90°C – к дальнейшему замедлению кристаллизации. Скорость кристаллизации падает до 0,046 мм/сутки, хотя при этом относительное пересыщение раствора ангидритом составляет 100%.

Так как скорость кристаллизации ангидрита практически не зависит от скорости движения жидкости и очень сильно увеличивается с ростом температуры, то можно считать, что процесс кристаллизации определяется кинетическими, а не диффузионными факторами.

Анализ лабораторных опытов показал, что для предотвращения инкрустации конструкция реактора-смесителя может включать в себя лишь одну емкость – ликвидатор пересыщения с вводом реагентов и ангидритной прокладки через инжектор-смеситель, выполняющий роль струйного подогревателя. Разложение NH_4Cl активной $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при такой температуре происходит весьма интенсивно, а для взаимодействия малоактивной CaO и снятия пересыщения в этих условиях потребуется менее 5 минут. Экспериментальные данные применения парогазового инжектора с температурой подачи пара $120 - 140^\circ\text{C}$, монтированного на штуцер подачи жидкости в реактор-смеситель показали высокую эффективность по

снятию пересыщения – концентрация сульфат-иона в жидкости смесителя падала в 1,5-2 раза [18]. Такая эффективность работы объясняется не только температурным режимом смеси, но и высокой интенсивностью перемешивания реагентов в инжекторе, что способствует быстрому протеканию реакции (1) образования сульфатов и их кристаллизации на поверхности твердой фазы в объеме жидкости.

Дальнейшее усовершенствование конструкции реактора-смесителя должно идти по пути разработки аппарата, имеющего две последовательно работающие реакционные зоны. Такое конструктивное решение позволило бы получить наилучшие условия для автоматического регулирования расхода известкового молока, создания и использования «кристаллической подкладки», снижающей пресыщение раствора по сульфату кальция и наиболее полного использования CaO , содержащегося в растворе известкового молока в виде малоактивной полусвязанной формы.

Так, в качестве первой реакционной зоны предложена барботажная секция, выполненная из трех провальных тарелок, где реакция проходит в пенном слое. В предлагаемой нами конструкции реактора-смесителя, представленной на рис. 3, грубодисперсная фаза известкового молока, отделенная на гидроциклоне после смесителя, карбонатное сырье (шлам рассолоочистки) и жидкость ТДС (содержащая хлорид аммония) с помощью парожидкостного инжектора (с температурой пара 120 – 140 °С) подаются в верхнюю барботажную секцию, работающую в пенном режиме.

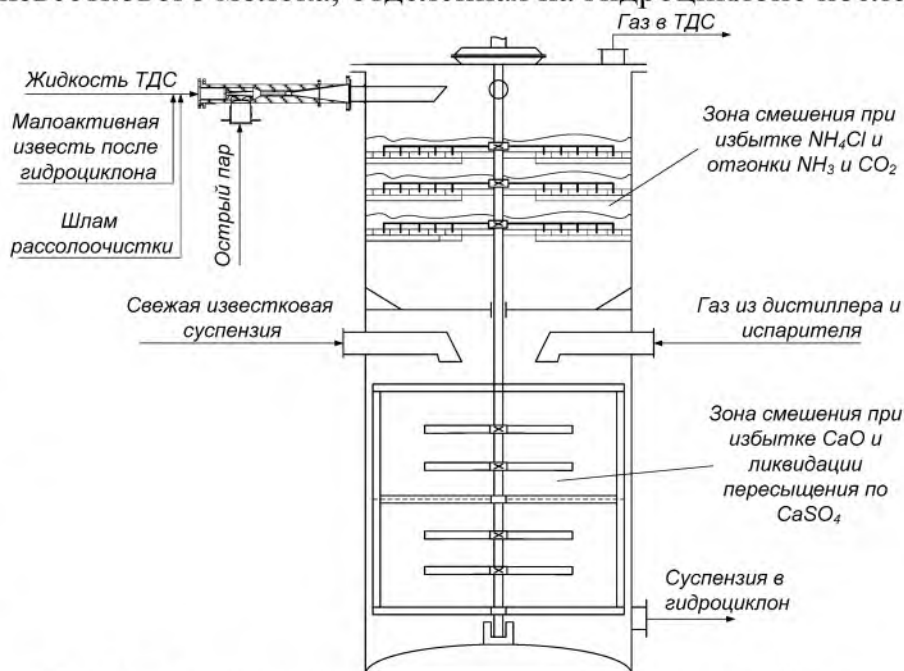


Рис. 3 – Принципиальная схема реактора-смесителя

Барботаж на провальных тарелках может осуществляться подачей газа дистиллера и частичной подачей острого пара, с целью поддержания температуры реакционной массы в районе 96–99°С, что также интенсифицирует вступление в реакцию малоактивных форм извести. В свою очередь отгонка аммиака и испарение части воды при температуре 96–99°С, согласно экспериментальным данным, полученным на синтетической жидкости смесителя, приводит к интенсификации выпадения кристаллов ангидрита в объеме жидкости. Это объясняется тем, что одновременно с химической реакцией разложения хлорида аммония происходит частичная дистилляция аммиака и испарение воды, в результате чего температура смеси несколько снижается, а концентрация Ca^+ возрастает, что приводит к кристаллизации и соосаждению карбоната и сульфата кальция.

Далее жидкость стекает в нижнюю зону, оборудованную рамной мешалкой, куда подается свежее известковое молоко. Эта зона выполняет функцию ликвидатора пересыщения раствора по сульфату кальция и завершения разложения хлорида аммония избытком активной извести, скорость которых по опытным данным составляет до 5 минут. В свою очередь, быстрый рост концентрации хлорида кальция в результате реакции разложения хлорида аммония способствует дальнейшей кристаллизации ангидрита в объеме жидкости на поверхности твердой фазы кристаллической затравки и кристаллах карбоната кальция.

Таким образом, проведенные нами исследования позволяют рекомендовать введение реагентов в реактор-смеситель с помощью парожидкостного инжектора, а в верхней части смесителя установить барботажные тарелки, под которые можно направить парогазовую смесь из дистиллера и часть острого пара для первичной отгонки аммиака. Все это позволит существенно сократить время пребывания реагентов, необходимое для снятия пересыщения по гипсу, в несколько раз уменьшить циркуляционный поток кристаллов ангидрита в реакторе смесителя, а также более полно использовать малоактивную часть известковой суспензии, утилизировать карбонаты шлама рассолоочиски, повысить содержание аммиака и CO_2 в газе дистиллера.

Выводы

1. В дистиллере содового производства имеет место значительное пересыщение по ангидриту. Инкрустации на стенках дистиллера могут образовываться за счет кристаллизации из раствора непосредственно ангидрита либо полугидрата сульфата кальция, который кристаллизуется из пересыщенного раствора на стенках дистиллера и постепенно переходит в ангидрит.

2. Эффективным методом предупреждения выпадения сульфатных инкрустаций в дистиллере является снятие пересыщения по сульфату в реакторе-смесителе.

3. Экспериментальные данные на синтетической жидкости реактора смесителя показали, что с ростом температуры интенсивность образования ангидрита увеличивается, следовательно увеличивается и скорость снятия пересыщения, которая при соответствующем температурном режиме, интенсивном смешении реагентов и в присутствии ангидритной прокладки составляет 5 – 10 минут.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют рекомендовать использование парожидкостного инжектора в качестве первичного смесителя и подогревателя реагентов, перед их подачей в промышленный реактор-смеситель, выполняющий функцию ликвидатора пересыщения.

5. Введение через инжектор циркуляционного потока твердой фазы и карбанатного сырья шлама рассолоочистки создает достаточное количество центров кристаллизации для быстрого снятия пересыщения в объеме жидкости. Отгонка части аммиака и воды непосредственно в смесителе на барботажных тарелках также способствует кристаллизации ангидрита и ускоряет процесс снятия пересыщения по гипсу.

Список литературы: 1. *Ткач, Г. А.* Производство соды по малоотходной технологии [Текст] / Г. А. Ткач, В. А. Шапорев, В. М. Титов. – Х.: ХГПУ, 1998. – 429 с. 2. *Коробочкин, В. В.* Производство карбоната натрия: учебное пособие [Текст] / В. В. Коробочкин, Д. А. Горлушко, И. В. Фролова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010 – 110 с. 3. *Onac, B. P.* Minerogenetic mechanisms occurring in the cave environment: an overview [Text] / B. P. Onac, P. Forti // International Journal of Speleology. – 2011. – Vol 40 (2). – pp. 79–98. 4. *Gainey, R. J.* CaSO₄ seeding prevents CaSO₄ scale [Text] / R. J. Gainey, C. A. Thorp, E. A. Cadwallader. //Ind. Eng. Chem. – 1963. – Vol. 55. – pp. 39–43. 5. *Lager, G. A.* A crystallographic study of the low-temperature dehydration products of gypsum CaSO₄·0,50H₂O and γ-CaSO₄ [Text] / G. A. Lager.// Am. Mineral. – 1984 – Vol. 69. – pp. 910–918. 6. *Kasikowski, T.* Utilization of distiller waste from ammonia-soda processing [Text] / T. Kasikowski, R. Buczkowski, B. Dejewski, K. Peszynska-Bialczyk, E. Lemanowska, B. Iglinski // Journal of Cleaner Production. – 2004. – Vol. 12, Issue 7. – P. 759–769. 7. *Husson, D.* Mechanism of calcium sulphate scale deposition on heat-transfer surfaces [Text] / D. Husson, J. Zahavi // hid. Eng. Chem. Fund. – 1970. – Vol. 9. – pp. 1–10. 8. *Krause, S.* Fouling of heat-transfer surfaces by crystallization and sedimentation [Text] / S. Krause // Int. Chem. Eng. – 1993. – Vol. 33 – 355 P. 9. *Крашенинников, С. А.* Технология кальцинированной соды и очищенного бикарбоната натрия / С.А. Крашенинников. – М. Высшая школа, 1985. – 287 с. 10. *Дрозин, Н. Н.* О механизме образования инкрустаций в дистиллере [Текст] / Н. Н. Дрозин, Е. К. Овечкин, М. И. Куцина // Труды НИОХИМ. – Харьков: НИОХИМ, 1959. – Том XII. – С. 97–109. 11. *Зеликин, М. Б.* Производство каустической соды химическими способами [Текст] / М. Б. Зеликин. – М.: Госатомиздат, 1961. – 230 с. 12. *Громова Е. Т.* К вопросу о предотвращении инкрустации в аппаратах и коммуникациях станции дистилляции содового производства [Текст] / Е. Т. Громова // Журнал прикладной химии. – 1961. – Т. 34. – С. 1502–1508. 13. *Südmalis, M.* Coprecipitation of CaCO₃ and CaSO₄ [Text] / M. Südmalis, R. Sheikholeslami // Can. J. Chem. Eng. –2000. – Vol. 78. – pp. 21-31. 14. *Höfling, V.* Crystallization fouling of the aqueous two-component system CaSO₄/CaCO₃ [Text] / V. Höfling, W. Augustin, M. Bohnet // J. Trans. Phenomena. – 2004. – Vol. 6. – pp. 99–109. 15. *Лукьянчиков, А. А.* Определение возможности ведения безинкрустационного процесса дистилляции при повышенных температурах [Текст] / А. А. Лукьянчиков, А. Я. Лобойко, Е. Н. Михайлова // Труды НИОХИМ. – Харьков: НИОХИМ, 2013. – Том 77. – С. 49 – 52. 16. *Михайлова, Е. Н.* Исследование возможности получения ангидритного режима дистилляции содового производства [Текст] / Е. Н. Михайлова // Труды НИОХИМ. – Харьков: НИОХИМ, 2005. – Том 74. – С. 18 – 21. 17. *Соколов, Е. Я.* Струйные аппараты [Текст] / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с. 18. *Филоненко, Д. В.* Исследование процесса разложения хлорида аммония гидроксидом кальция на модели реактора инжекторного смешения [Текст] / Д. В. Филоненко, М. А. Цейтлин, В. Ф.Райко, А. В. Шестопалов // Уральский научный вестник (Оралдың ғылым жаршысы). Серия «Технические науки». – Уральск: ТОО «Уралнаука», 2014. – № 41 (120) – С. 77 – 84.

Bibliography (transliterated): 1. *Tkach, G. A., Shaporev, V. P., Titov, V. M.* (1998) Production of soda on low-waste technology, Kharckov, KHGPU. 2. *Korobochkin, V. V., Gorlushko, D. A., Frolova, I. V.* (2010) Production of carbonate of sodium, Tomsk: Tomsk polytechnic university. 3. *Onac, B. P., Forti P.* (2011). Minerogenetic mechanisms occurring in the cave environment: an overview. International Journal of Speleology, 40 (2), 79-98. Tampa, FL (USA). ISSN 0392-6672. DOI: 10.5038/1827-806X.40.2.1 4. *Gainey, R. J., Thorp, C. A., Cadwallader, E. A.* (1963). CaSO₄ seeding prevents CaSO₄ scale. Ind. Eng. Chem., V. 55, 39-43. DOI: 10.1021/ie50639a009 5. *Lager, G. A.* (1984) A crystallographic study of the low-temperature dehydration products of gypsum CaSO₄·0,50H₂O. and γ-CaSO₄, Am. Mineral. V. 69, 910-918. 6. *Kasikowski, T. et all.* (2004) Utilization of distiller waste from ammonia-soda processing. Journal of Cleaner Production, V. 12 (7), 759-769. doi:10.1016/s0959-6526(03)00120-3 7. *Husson, D., Zahavi, J.* (1970) Mechanism of calcium sulphate scale deposition on heat-transfer surfaces, hid. Eng. Chem. Fund., 9, 1-10. 8. *Krause, S.* (1993) Fouling of heat-transfer surfaces by crystallization and sedimentation, Int. Chem. Eng., 33: 355. 9. *Krashennnikov, S. A.* Technology of the calcinated soda and cleared bykarbonata of sodium, Moscov: High school. 10. *Drozin, N. N., Ovechkin, E. K. Kutsina M. I.* (1959). About the mechanism of formation of encrustations in dystyllere. Kharckov: NIOCHIM, V. 12, 97–109. 11. *Zelikin, M. B.*

(1961) Production of caustic soda by chemical methods. Moscow: Gosatomizdat. **12.** Gromova E. T. (1961) To the question about prevention of encrustation in aparatakh and communications of the station of distillation of soda production. Journal of Applied Chemistry, V. 34, 1502–1508 **13.** Südmalis, M., Sheikholeslami, R. (2000) Coprecipitation of CaCO₃ and CaSO₄, Can. J. Chem. Eng. V. 78, 21-31. **14.** Höfling, V., Augustin, W., and Bohmet, M. (2004). Crystallization fouling of the aqueous two-component system CaSO₄/CaCO₃, J. Trans. Phenomena. V. 6., 99-109. **15.** Luk'yanchikov, A. A., Loboyko A. Ya., Mikhaylova E. N. (2013). Determination of opportunity of non-crusting distillation process under elevated temperatures. Kharckov: NIOCHIM, V. 77, 49–52. **16.** Mikhaylova E. N. (2005) Study in anhydride condition ensuring at soda ash plant distillation unit. Kharckov: NIOCHIM, V. 74, 18–21. **17.** Sokolov, E. Ya. (1989) Streams vehicles. Moscow: Москва: Energoatomizdat. **18.** Filonenko, D. V. Rayko, V. F., Shestopalov, O. V. (2014) Research of process decomposition of salmiac by calcium hydroxide on the model of reactor of the injector mixing. Ural scientific announcer (Оралдың ғылым жаршысы). Ural'sk: Uralnauchkniga, V. 41 (120), 77 – 84.

Надійшла (received) 18.12.2014

УДК 628.3:658.512:66.011

О. К. НЕСТЕРЕНКО, студентка, НТУУ «КПІ», Київ;
Т. В. БОЙКО, канд. техн. наук, зав. каф., НТУУ «КПІ», Київ;
Ю. О. БЕЗНОСИК, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАСОПЕРЕНОСЕННЯ ГЕКСАНУ В ПОРАХ СИЛІКАГЕЛЮ

У статті на основі отриманих експериментальних даних, отриманих на лабораторній установці, розглянуто процес масопереносу гексану в порах зерна силікагелю. Показано, що процес масопереносу описується дифузійною моделлю, яка може бути апроксимована на різних ділянках запропонованими математичними залежностями. Розраховано чисельні значення коефіцієнта дифузії та встановлено, що вони не залежать від температури. Визначені швидкості руху газу в порах.

Ключові слова: процес, масопереносу, гексану, дифузійна, модель, зерна, силікагелю, порах, математичними, залежностями.

Вступ. Процеси масопереносу відіграють ключову роль у багатьох промислових синтезах. Особливо це стосується тих технологічних процесів, які включають стадію гетерогенного каталізу. Зокрема обов'язковою стадією гетерогенно-каталітичної реакції є перенесення речовини до активної поверхні, як правило твердої частинки. Швидкість такого процесу може бути лімітована дифузією реагентів до поверхні частинки та дифузією реагентів у порах зерна каталізатора. Таке дифузійне гальмування процесу зазвичай супроводжується ускладненнями із відводом тепла реакції, що призводить до перепадів температури всередині пористого зерна каталізатора, а також між поверхнею частинки та потоком реагентів [1]. Крім того, додаткові ускладнення, часом досить суттєві, вносять гідродинамічні умови проведення процесу, такі як характер руху газу чи рідини, які призводять до виникнення конвективного переносу тепла і речовини [2, 3]. Тому для регулювання технологічних параметрів та успішного керування промисловими процесами дуже важливо знати теоретичне підґрунтя процесів та взаємозв'язки між ними, які впливають із теоретичних законів та рівнянь масопереносу.

© О. К. НЕСТЕРЕНКО, Т. В. БОЙКО, Ю. О. БЕЗНОСИК, 2014

Метод діафрагм. Метою даної роботи є розробка і вивчення аналітичної моделі дифузії газів у пористих тілах та її експериментальна перевірка.

Метод діафрагм дозволяє одночасно вивчати кінетику реакції і процеси дифузії на пористому каталізаторі. Суть цього методу полягає у наступному. В реакторі встановлюється пластина із матеріалу каталізатора, яка розділяє реактор на дві окремі камери. В одну з камер подають газ-дифузат, а в іншій фіксують його кількість залежно від часу. Принципову схему діафрагми та потоків газу зображено на рис. 1.

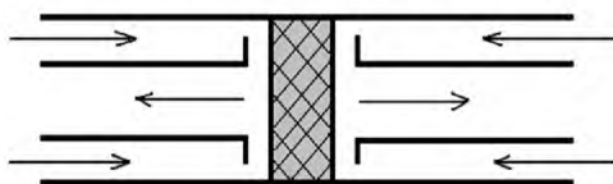


Рис. 1 – Принципова схема діафрагми та потоків газу

Проте суттєвим недоліком цього методу є те, що в процесі масопереносу беруть участь лише відкриті пори, в той час як у зерні каталізатора присутні пори обох типів – відкритого і закритого [4].

Експериментальне дослідження процесу масоперенесення гексану в порах силікагелю. Для проведення досліджень процесів масоперенесення в Інституті фізичної хімії ім. Л.В.Писаржевського НАН України модифіковано серійний газовий хроматограф ЛХМ-72. Зокрема замість хроматографічної колонки була встановлена проточна комірка. Проточна комірка має вхідний та вихідний отвори. Крізь вхідний отвір до проточної комірки із постійною заданою об'ємною швидкістю подають інертний газ аргон та імпульси дифузату-гексану. Через вихідний отвір газу відводять до детектора хроматографа. Всередині проточної комірки встановлено гранулу каталізатора, яка відкрита для доступу дифузату лише з одного боку, а з інших боків закрита інертним непористим матеріалом – силікатом натрію. Це було здійснено для того, щоб закрити наскрізні пори в зерні силікагелю. Схему модифікованої проточної комірки у перерізі зображено на рис. 2.

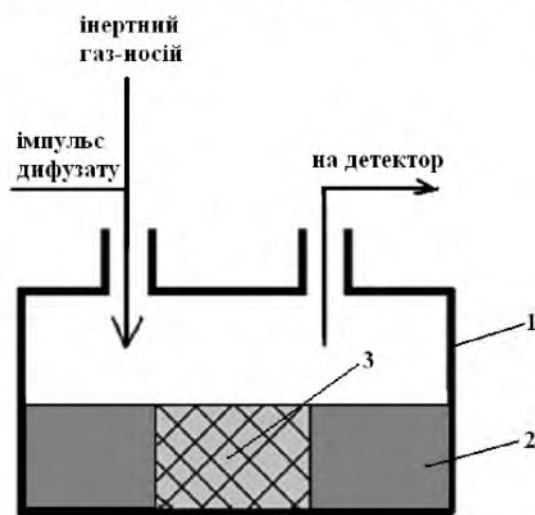


Рис. 2 – Схема проточної комірки: 1 – корпус проточної комірки; 2 – інертний непроникний матеріал; 3 – зерно силікагелю

Таку модифікацію хроматографічної установки було проведено з метою створення проточної комірки, яка б давала можливість: вивчати закономірності масоперенесення в реальному зерні каталізатора; досліджувати масоперенесення з усіх наявних відкритих пор, а не тільки наскрізних; відтворити гідродинамічний режим перебігу процесу на зерні каталізатора в умовах, максимально наближених до реальних промислових гетерогенно-каталітичних процесів. Крім того, така модифікація є дуже простою і не потребує спеціального дорогого обладнання чи складної підготовки до проведення дослідів [4, 5].

Методика виконання дослідів. Дослідження було проведене таким чином. Газ-носії аргон з постійною швидкістю потоку (20 або 30 см³/хв.) пропускали крізь проточну комірку із гранулою силікагелю, яка знаходилася у термостаті хроматографа (температура у термостаті змінювали у межах значень 80, 100, 120°C).

В робочому режимі до хроматографа через пристрій введення проб за допомогою шприца інжектували проби гексану об'ємом 0,3 см³ та 0,5 см³. Після інжекції гексану спостерігається пік на хроматограмі внаслідок реєстрації речовини детектором на виході із проточної комірки. Пік має розмиту праву частину внаслідок процесів масоперенесення гексану у порах силікагелю, які відбуваються завдяки проходу фронту речовини над гранулою силікагелю, та зумовлена особливостями інжекування проби до хроматографа, а саме експоненціальним способом введення проби.

По мірі транспорту гексану з пор силікагелю потоком газу-носія гексан переноситься із проточної комірки до полум'яно-іонізаційного детектора, де відбувається іонізація полум'я, горіння якого підтримується безперервною подачею повітря із швидкістю 120-140 см³/хв. та азот-водневою сумішшю у співвідношенні 1:10 із швидкістю 30-35 см³/хв. Внаслідок іонізації полум'я змінюється його електропровідність, що фіксується детектором шляхом подачі відповідного аналогового сигналу, та через аналого-цифровий перетворювач передається у цифровому вигляді до персонального комп'ютера, де за допомогою комп'ютерної програми «ХРОМАТОГРАФІЯ-1.5» формується графічне зображення хроматограми у вигляді залежності інтенсивності сигналу від часу та зберігаються текстові файли із вказаною залежністю. Блок-схему хроматографічної установки наведено на рис. 3.

В результаті проведення дослідів одержано графіки залежності кількості гексану від часу десорбції із пор зерна силікагелю. Графік залежності кількості гексану від часу для дослідів із зерном катализатора наведено на рис. 4.

Припустимо, що процес масоперенесення у порах зерна силікагелю має виключно дифузійний характер і описується рівнянням другого закону Фіка. Задамо початкові та граничні умови відповідно до яких початкова концентрація дифузату у зерні катализатора є відомою, а потік дифузату відбувається лише в одному напрямку та пропорційний добутку концентрації газу на певний коефіцієнт проникності:

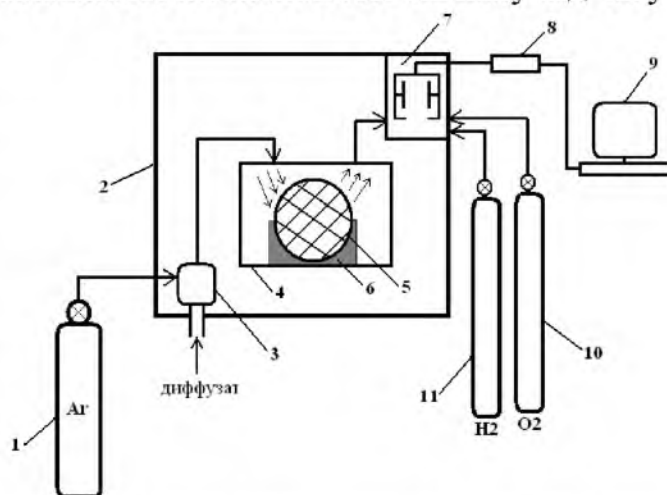


Рис. 3 – Схема установки: 1 – джерело газу-носія; 2 – хроматограф; 3 – пристрій для введення проб дифузату; 4 – проточна комірка; 5 – гранула; 6 – інертний непористий матеріал; 7 – полум'яно-іонізаційний детектор; 8 – аналого-цифровий перетворювач; 9 – персональний комп'ютер; 10, 11 – джерела кисню та водню

$$C(0, x) = C_0;$$

$$dC/dx (x = 0) = 0;$$

$$dC/dx (x = L) = -\gamma C;$$

де C – лінійна концентрація метану у зерні каталізатора, моль/см; γ – коефіцієнт проникності, см/с; L – товщина зерна каталізатора, см.

Розв'язком рівняння дифузії за заданих початкових і граничних умов відносно частки метану, що дифундує із пор гранули, є таке рівняння [6,7]:

$$M(t) = 2 \sum_1^{\infty} \frac{\exp(-\lambda^2 Dt/L^2) \sin \lambda}{\lambda^2 + \lambda \sin \lambda \cos \lambda},$$

де λ – позитивні корені характеристичного рівняння $\lambda \cdot \operatorname{tg} \lambda = l \cdot \gamma / D$.

Таким чином залежність долі десорбованого із пор силікагелю гексану від часу пропорційна експоненті у степені часу із деякими коефіцієнтами A та α :

$$M(t) \sim A \exp(-\alpha t).$$

Зважаючи на це, залежність долі гексану від часу має бути чисельно описана експоненціальним рівнянням із розрахованими параметрами A та α . Експоненціальний опис залежності долі гексану від часу наведено на рис. 5.

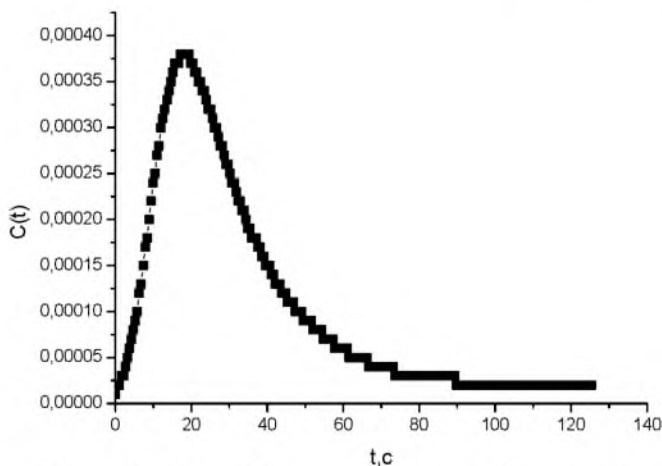


Рис. 4 – Графік залежності кількості дифузату від часу для досліджуваного зерні каталізатора

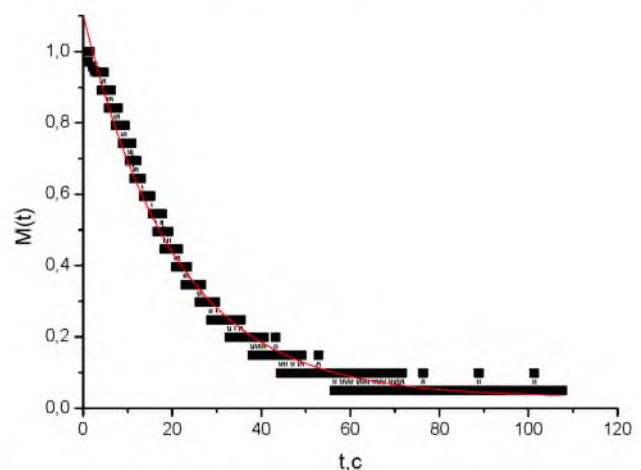


Рис. 5 – Експоненціальний опис залежності долі гексану від часу

З рис. 5 можна зробити висновок, що одержана експериментальна залежність долі десорбованого з пор зерна каталізатора гексану від часу не є експоненціальною та не може бути описана рівнянням молекулярної дифузії на всьому проміжку часу. З огляду на це, рівняння масоперенесення необхідно ускладнити, включивши до нього інші складові, які впливають на процес масоперенесення гексану у порах силікагелю, наприклад, конвективну складову, та проаналізувати експериментальну криву, розділивши її на окремі ділянки по осі абсцис [8].

Позначимо точку T_1 , яка відповідає максимуму частки десорбованого гексану із пор зерна силікагелю ($t=0$); точки перетину T_2 та T_3 ($t=13,547$ с та

$t=23,953\text{c}$ відповідно); точку T4, яка відповідає мінімально можливій кількості гексану, яку можна зафіксувати даним методом ($t=106,031\text{c}$). Відповідно до зазначених точок експериментальний графік частки гексану від часу необхідно проаналізувати на кожній з трьох ділянок по осі абсцис.

Поділ експериментального графіка на ділянки відповідно до точок перегину зображено на рис. 6.

На ділянці T1 – T2 залежність частки гексану від

часу десорбції із зерна каталізатора є лінійною. З огляду на це можна припустити, що ця ділянка графіка відповідає руху газу із постійною швидкістю, тобто лімітуючою стадією процесу масоперенесення є конвекція. Таким чином на цій ділянці процес переносу маси буде описуватись рівнянням конвекції:

$$dC/dt = -v dC/dx.$$

Розв'язком такого рівняння є лінійна функція виду $y = -k x$ для залежності частки десорбованого гексану від часу:

$$M(t) = -v/l t,$$

де l – товщина зерна каталізатора, см; v – лінійна швидкість руху газу у мембрані, см/с.

Дане рівняння кількісно описує одержані експериментальні точки на ділянці графіка залежності частки гексану від часу T1 – T2 та дозволяє визначити параметр v/l із якого можна розрахувати чисельне значення лінійної швидкості руху газу при відомій товщині мембрани [9].

Таким чином встановлено, що на відріжку часу (0...13,547с) експериментальна залежність частки десорбованого із пор зерна каталізатора гексану від часу може бути кількісно описана одномірним рівнянням конвекції, та розраховано значення лінійної швидкості руху газу у порах силікагелю.

На ділянці часу T2 – T3 залежність частки гексану від часу не є лінійною. Шляхом апроксимації експериментальних точок до одиниці по осі ординат та до нуля по осі абсцис відповідно до частки гексану в точці T2 одержано графік залежності частки гексану від часу виходу для ділянки T2 –T3. Така апроксимація необхідна, оскільки весь графік залежності частки гексану від часу не може бути описаний одним рівнянням.

З огляду на не лінійність залежності частки гексану від часу можна припустити, що на ділянці T2 – T3 конвективна та дифузійна складові масоперенесення мають однаковий порядок, а тому на даній ділянці часу масоперенесення є сумою цих процесів згідно одномірного рівняння дифузії з урахуванням конвекції. За допомогою програмного пакету Wolfram Mathematica 7.0 шляхом підстановки значень лінійної швидкості руху газу у порах зерна каталізатора, одержаних на

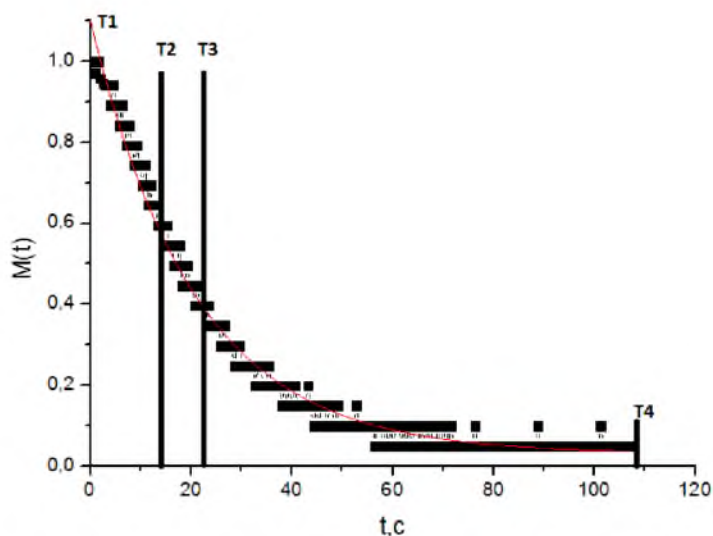


Рис. 6 – Поділ експериментального графіка залежності частки гексану від часу

попередньому етапі розрахунку, та задавши граничну умову експоненціального зменшення концентрації дифузату у порах зерна каталізатора:

$C(x, 0) = 1 - \exp[-150(1 - x)]$, одержано чисельний розв'язок рівняння обмеженої дифузії з урахуванням конвекції та розраховане чисельне значення коефіцієнта молекулярної дифузії.

Отже, встановлено, що на відрізку часу (13,547...23,953с) експериментальна залежність частки десорбованого із пор зерна каталізатора гексану від часу може бути кількісно описана одномірним рівнянням дифузії з урахуванням конвекції.

Таким чином встановлено, що значення коефіцієнта дифузії практично не залежать від температури та швидкості руху газу-носія, але залежать від кількості дифузату [10]. На ділянці часу T3 – T4 графік залежності частки гексану від часу не є лінійним. Оскільки вся експериментальна залежність частки гексану від часу не описується одним рівнянням, то шляхом апроксимації експериментальних точок до одиниці по осі ординат та до нуля по осі абсцис відповідно до долі гексану в точці T3 одержано графік залежності долі гексану від часу виходу із пор силікагелю для ділянки T3 – T4.

З огляду на не лінійність залежності долі гексану від часу можна припустити, що на ділянці T3 – T4 має місце виключно дифузійне масоперенесення, тобто дифузійна складова масоперенесення набагато більша за конвективну і відповідно є лімітуючою стадією процесу переносу маси на даній ділянці графіка. Таким чином залежність частки десорбованого гексану від часу може бути описана рівнянням обмеженої дифузії згідно другого закону Фіка в одномірному випадку. За допомогою програмного пакету Wolfram Mathematica 7.0, задавши граничну умову експоненціального зменшення концентрації дифузату у порах зерна каталізатора одержано чисельний розв'язок рівняння молекулярної дифузії та розраховано чисельне значення коефіцієнта молекулярної дифузії.

Чисельні значення коефіцієнта молекулярної дифузії та відповідні коефіцієнти кореляції, одержані таким методом розрахунку, наведені у табл. 1

Таблиця 1 – Розрахункова таблиця коефіцієнтів молекулярної дифузії та коефіцієнтів кореляції

Температура, °С	Швидкість потоку газу-носія, см ³ /хв	Кількість дифузату, см ³	Коефіцієнт молекулярної дифузії, см ² /с	Коефіцієнт кореляції, %
80	20	0,3	0,012	93,9
		0,5	0,012	96,4
	30	0,3	0,010	97,7
		0,5	0,012	98,3
100	20	0,3	0,012	95,0
		0,5	0,009	96,9
	30	0,3	0,017	97,6
		0,5	0,008	95,5
120	20	0,3	0,0115	96,7
		0,5	0,011	96,0
	30	0,3	0,017	96,1
		0,5	0,0145	96,7

Висновки

1. Окремо виділено та підтверджено експериментальними розрахунками лімітуючі стадії масопереносу, якими є відповідно конвекція, дифузія, рівновага між конвекцією і дифузією.

2. Розраховано чисельні значення коефіцієнта дифузії та встановлено, що вони не залежать від температури.

3. Визначено чисельні значення кінетичної складової процесу масоперенесення, а саме швидкості руху газу в порах.

Список литературы: 1. *Иоффе, И. И.* Инженерная химия гетерогенного катализа [Текст] / *И. И. Иоффе, Л. М. Письмен* – М. : Химия, 1965. – 456 с. 2. *Касаткин, А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / *А. Г. Касаткин* – М. : Госхимиздат, 1961. – 830 с. 3. *Франк-Каменецкий, Д. А.* Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: Учебник-монография. – 4-е изд. [Текст] / *Д. А. Франк-Каменецкий* – Долгопрудный : Издательский дом «Интеллект», 2008. — 408 с. 4. *Гольберт, К. А.* Введение в газовую хроматографию. – 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] / *К. А. Гольберт, М. С. Видергауз* – М. : Химия, 1990. – 352 с. 5. *Царев, Н. И.* Практическая газовая хроматография: Учебно-методическое пособие для студентов химического факультета по спецкурсу «Газохроматографические методы анализа» [Текст] / *Н. И. Царев, В. И. Царев, И. Б. Катраков* – Барнаул : Изд-во Алт. Ун-та, 2000. – 156 с. 6. *Crank, J.* The Mathematics of Diffusion [Text] / *J. Crank* – London: Oxford University Press, 1970. – 347 p. 7. *Liu, J. Y.* Solutions of Diffusion Equation with Constant Diffusion and Surface Emission Coefficients [Text] / *J. Y. Liu, W. T. Simpson* // Drying Technology. – 1997. №15 (10). – P. 2459 – 2477. 8. *Khriachtchev, L.* A stable argon compound [Text] / *L. Khriachtchev, M. Pettersson, N. Runeberg, J. Lundell, M. Räsänen* // Nature – 24 August 2000. №406. – P. 874 – 876. 9. *Li, J.* Noble Gas-Actinide Compounds: Complexation of the CUO Molecule by Ar, Kr, and Xe Atoms in Noble Gas Matrices [Text] / *J. Li, E. B. Bursten, B. Liang, L. Lester Andrews* // Science. – 22 March 2002. Vol. 295. №5563. – P. 2242 – 2245. 10. *Равдель, А. А.* Краткий справочник физико-химических величин. Издание девятое [Текст] / *А. А. Равдель, А. М. Пономарева* – СПб.: Специальная литература, 1999. – 232 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Ioffe, I. I., Pis'men, L. M.* (1965) Engineering chemistry heterogeneous catalysis - Moscow: Chemistry. – 456. 2. *Kasatkin, A. G.* (1961) The basic processes and apparatus of chemical technology – Moscow: Goshimizdat, – 830. 3. *Frank-Kameneckij, D. A.* (2008) Basics Macrokinetics. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics: a Textbook monograph, 4th ed – Dolgoprudnij: Publishing house "Intelligence" – 408. 4. *Golbert, K. A., Vidergaus, M. C.* (1990) Introduction to gas chromatography. – 3rd ed., Rev. And add. – Moscow: Chemistry. – 352. 5. *Carev, N. I., Carev, V. I., Katrakov, I. B.* (2000) Practical gas chromatography: textbook for students of chemical faculty on course "gas Chromatographic methods of analysis" – Barnaul: Publishing house of Alt. University. – 156. 6. *Crank, J.* (1970) The Mathematics of Diffusion – London: Oxford University Press. – 347. 7. *Liu, J. Y., Simpson W. T.* (1997) Solutions of Diffusion Equation with Constant Diffusion and Surface Emission Coefficients – Drying Technology. – №15 (10), 2459–2477. 8. *Khriachtchev, L. A., Pettersson, M., Runeberg, N., Lundell, J., Räsänen M.* (24.08.2000) stable argon compound - Nature. №406, 874–876. 9. *Li, J., Bursten, E. B., Liang, B., Lester Andrews, L.* (22.03.2002) Noble Gas-Actinide Compounds: Complexation of the CUO Molecule by Ar, Kr, and Xe Atoms in Noble Gas Matrices - Science. – Vol. 295. №5563, 2242–2245. 10. *Ravdel, A. A., Ponomareva A. M.* (1999) A brief Handbook of physical-chemical variables. Ed. 9 – SPb.: Special literature. – 232.

Надійшла (received) 11.12.2014

Ю. Н. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПИ», Киев;

В. А. НЕДОБОЙ, аспирант, НТУУ «КПИ», Киев;

ХАМУЙЕЛА Ж. А. ГЕРРА, докторант, НТУУ «КПИ», Киев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАЖИМНОГО ПАТРОНА

В работе рассмотрены результаты исследования силовых и жесткостных характеристик высокоскоростного инструментального зажимного патрона. Представлены зависимости силы проталкивания и момента прокручивания от давления зажима, рассчитаны коэффициенты усиления для обоих случаев и построены графики их зависимости от давления зажима. Также был проведен эксперимент по определению упругих отжатий патрона и представлены зависимости радиальной жесткости и радиальных отжатий от давления зажима оправок.

Ключевые слова: инструментальный зажимной патрон, сила проталкивания, момент прокручивания, радиальная жесткость, давление зажима.

Введение. Использование современных инструментальных зажимных систем для механической обработки позволяет значительно повысить скорости резания (частоту вращения шпинделя) на станках, в частности, сверлильных, фрезерных и обрабатывающих центрах [1].

Невозможность повышения частоты вращения инструментов вызвана высокими центробежными силами. Поэтому актуальным является использование и создание инструментальных зажимных патронов (ИЗП), обеспечивающих высокую силу зажима, что компенсирует влияние центробежных сил.

Ранее в работах ученых были рассмотрены принципы создания и проведены экспериментальные исследования высокоскоростных ИЗП, в том числе с упругими элементами [2–8].

Для установления полной картины необходимо провести эксперименты, отражающие силовые и жесткостные характеристики ИЗП.

Цель работы. Исследование и обоснование силовых и жесткостных характеристик ИЗП для определения основных зависимостей и характеристик процессов при различных величинах давления зажима.

Материал и результат исследований. Для исследования силовых характеристик инструментального зажимного патрона нужно провести эксперименты на проталкивание и прокручивание оправки определенного диаметра, зажатой с определенным давлением в ИЗП [10]. В качестве объекта исследований выбран высокоскоростной ИЗП типа CoroGrip (рис. 1)

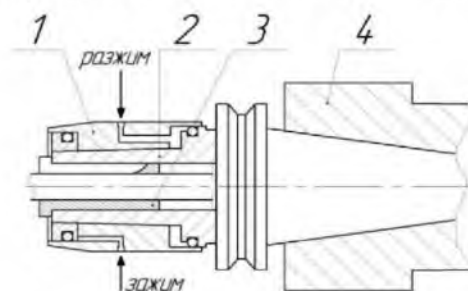


Рис. 1 – Разрез ИЗП типа CoroGrip в комплекте: 1 – подвижная конусная втулка; 2 – неподвижная упорная конусная втулка; 3 – сменная цилиндрическая цанга; 4 – шпиндель

Определение момента прокручивания M_{pr} проводилось на токарном станке согласно схемы (рис. 2).

Для проведения данного эксперимента на станке был осуществлен кинематический замок, поскольку для измерения M_{pr} оправки ИЗП должен быть неподвижным (рис. 3).

В патроне 1 станка через переходной цилиндрический элемент 2 был зажат ИЗП 3, а в сам ИЗП зажата оправка 4. Нагружение производилось с помощью динамометрической рукоятки 5 (рис. 2). Измерения происходили при разных значениях p_c – давления зажима оправки (10-60). Замеры по индикатору 6 проводятся трижды.

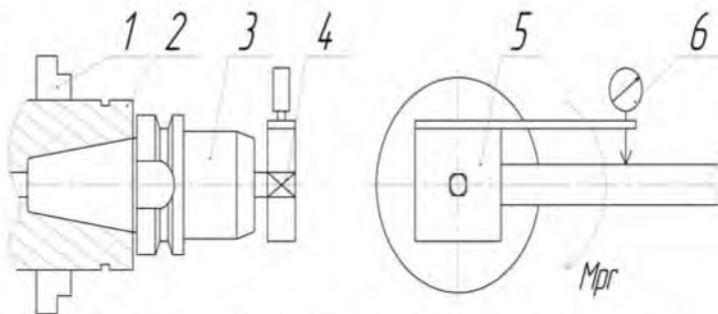


Рис. 2 – Схема измерения момента прокручивания M_{pr}



Рис. 3 – Измерение момента прокручивания M_{pr} оправки $d=12$ мм

По этим данным получен коэффициент усиления патрону k'_{af} .

Момент прокручивания M_{pr} зависит от давления p_c , площади гидроцилиндра F_c и коэффициента сцепления (трение) μ_1 оправки с зажимным элементом [9,10].

На входе в зажимной патрон осевая сила

$$S_{\Sigma} = p_c \cdot F_c, \quad (1)$$

Для определения коэффициента усиления сначала нужно найти M_{pr} :

$$M_{pr} = \frac{T'_{\Sigma} \cdot \mu_1 \cdot d}{2}, \quad (2)$$

где d – диаметр оправки, μ_1 – коэф. трения при прокручивании

Откуда

$$T'_{\Sigma} = \frac{2M_{pr}}{\mu_1 \cdot d}, \quad (3)$$

а коэффициент усиления (табл. 1)

$$k'_{af} = \frac{T'_{\Sigma}}{S_{\Sigma}} = \frac{2M_{pr}}{\mu_1 \cdot d \cdot p_c \cdot F_c}, \quad (4)$$

После обработки результатов построены графики зависимости: $M_{pr} = f(p_c)$ – рис. 4; $k'_{af} = f(p_c)$ для различных μ_1 – рис. 5.

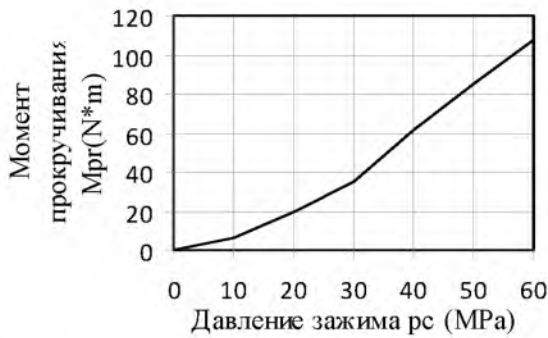


Рис. 4 – График зависимости момента прокручивания M_{pr} от давления зажима p_c

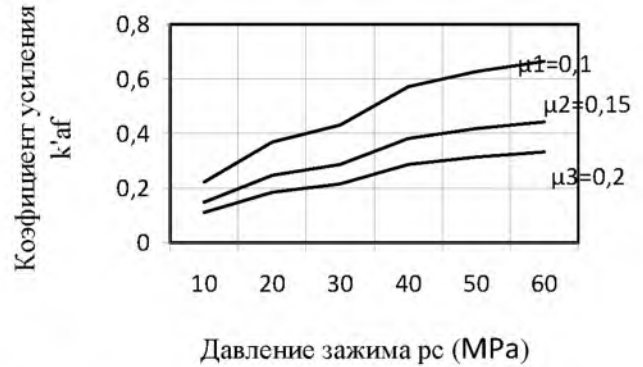


Рис. 5 – График зависимости коэф. усиления k'_{af} от давления зажима p_c

Таблица 1 – Значение коэффициента усиления k'_{af}

Давление зажима p_c , МПа	Коэффициент усиления k'_{af} при μ_1		
	0,1	0,15	0,2
10,0	0.2212	0.1474	0.1106
20,0	0.3687	0.2458	0.1843
30,0	0.4301	0.2867	0.2150
40,0	0.5715	0.3810	0.2857
50,0	0.6268	0.4178	0.3134
60,0	0.6637	0.4424	0.3318

Измерение силы проталкивания проводилось на токарном станке согласно схемы (рис. 6). В патроне 1 станка с помощью переходного цилиндрического элемента 2 был закрепленный ИЗП 3. В ИЗП была зажата оправка 4 – $\varnothing 12$ мм. Между оправкой и задним центром 6 был установлен динамометр 5. Нагрузка происходила при помощи передвижения заднего центра и суппорта (рис. 7, а, б). Для проведения экспериментов использовались индикатор часового типа 7 с ценой деления 0,01 мм.

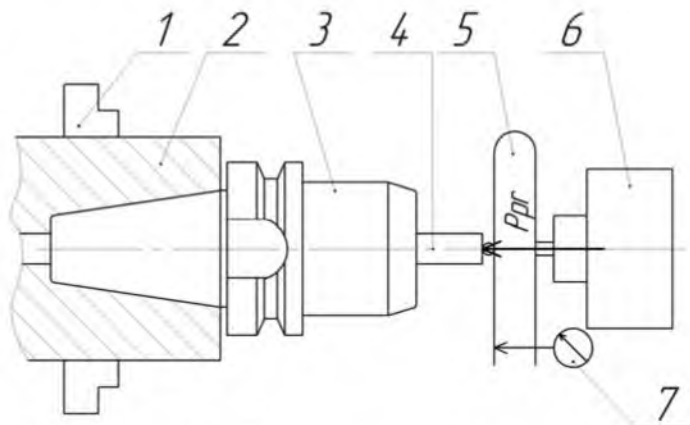


Рис. 6 – Схема измерения силы проталкивания P_{pr}

Для каждого из давления p_c (10, 20, 30, 40, 50, 60 Мпа) результат фиксировался после того, как оправка приходила в движение (проскальзывается). Опыт повторялся три раза и определялось среднее значение.

По тонирующему графику динамометра значения индикатора пересчитывались в силу проталкивания P_{pr} .

Сила проталкивания P_{pr} зависит от давления p_c , площади гидроцилиндра F_c и коэффициента сцепления (трение) μ_2 оправки с зажимным элементом [9,10]..



а



б

Рис. 7 – Измерение силы проталкивания оправки $d=12$ мм в инструментальном зажимном патроне: а – нагрузка задним центром; б – нагрузка суппортом

На входе в зажимной патрон осевая сила

$$S_{\Sigma} = p_c \cdot F_c, \quad (5)$$

а на выходе нормальная (радиальная) сила зажима

$$T_{\Sigma}'' = \frac{P_{pr}}{\mu_{21}}, \quad (6)$$

Тогда коэффициент усиления патрона будет (табл. 2):

$$k_{af}'' = \frac{T_{\Sigma}''}{S_{\Sigma}} = \frac{P_{pr}}{\mu_2 \cdot p_c \cdot F_c}, \quad (7)$$

По полученным данным построим графики зависимостей $P_{pr} = f(p_c)$ (рис. 8) и $k_{af}'' = f(p_c)$ при различных значениях μ_2 (рис. 9).

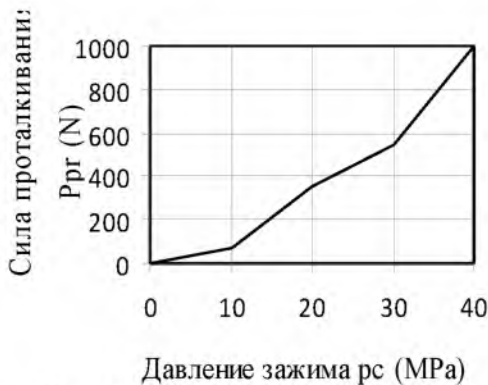


Рис. 8 – График зависимости силы проталкивания P_{pr} от давления зажима p_c

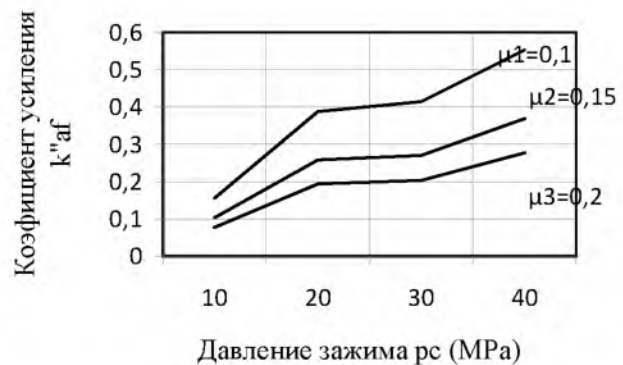


Рис. 9 – График зависимости коэф. усиления k_{af}'' от давления зажима p_c

Таблица 2 – Значение коэффициента усиления k_{af}''

Давление зажима p_c , Мпа	Коэффициент усиления k_{af}'' при μ_2		
	0,1	0,15	0,2
10,0	0,1548	0,1031	0,0774
20,0	0,3871	0,2581	0,1935
30,0	0,4136	0,2704	0,2028
40,0	0,5530	0,3687	0,2765

Пересчет коэффициента усиления патрона k'_{af} и k''_{af} по результатам экспериментов на силу проталкивания и момента прокручивания показал, что они почти совпадают по характеру изменения и величине, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Определение упругих радиальных отжиманий (радиальной жесткости) выполнялся на том же токарном станке согласно схемы (рис. 10) [8, 10].

В патроне 1 станка с помощью переходного цилиндрического элемента 2 был закрепленный ИЗП 3.

В ИЗП была закреплена оправка 4 ($d=12$ мм). Нагружение осуществлялось через динамометр 5 на вылете 50 мм. С одной стороны прикладывалась радиальная сила P_r через динамометр (с индикатором I_r , 7) путем нагрузки от поперечного перемещения суппорта 6 станка, а с другой установлен индикатор I_{rs} 8 для измерения радиальных отжатий (рис. 11). Замеры выполнялись с повторением 3 раза. Измерения проводились при разных значениях p_c (10, 20, 30, 40, 50, 60 МПа). Радиальная сила нагрузки создавалась от $P_r=200$ Н до 1000Н (с интервалом 200Н). Показания индикатора I_{rs} фиксировались при ступенчатой нагрузке и разгрузке, а показатели индикатора I_r по тарировочному графику.

По результатам экспериментов построены графики зависимости $j_r = f(p_c)$ (рис. 12), а также отжатий Y_{rs} от силы P_r при нагрузке и разгрузке (рис. 13).

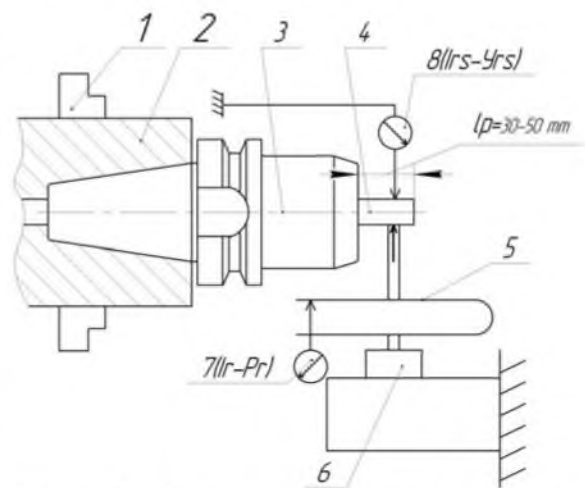


Рис. 10 – Схема измерений упругих радиальных отжатий



Рис. 11 – Измерения радиальной жесткости j_r оправки $d=12$ мм

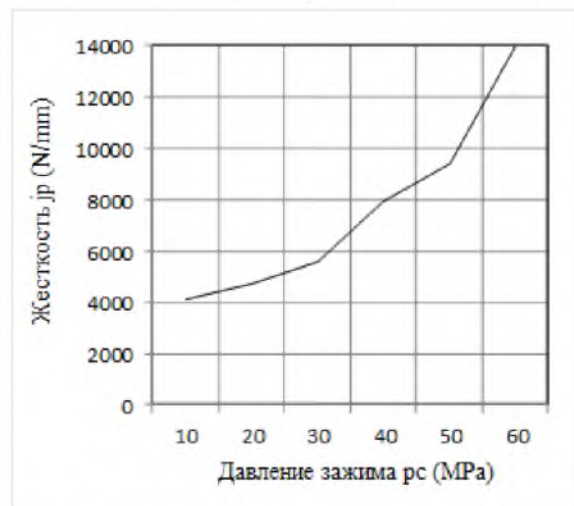
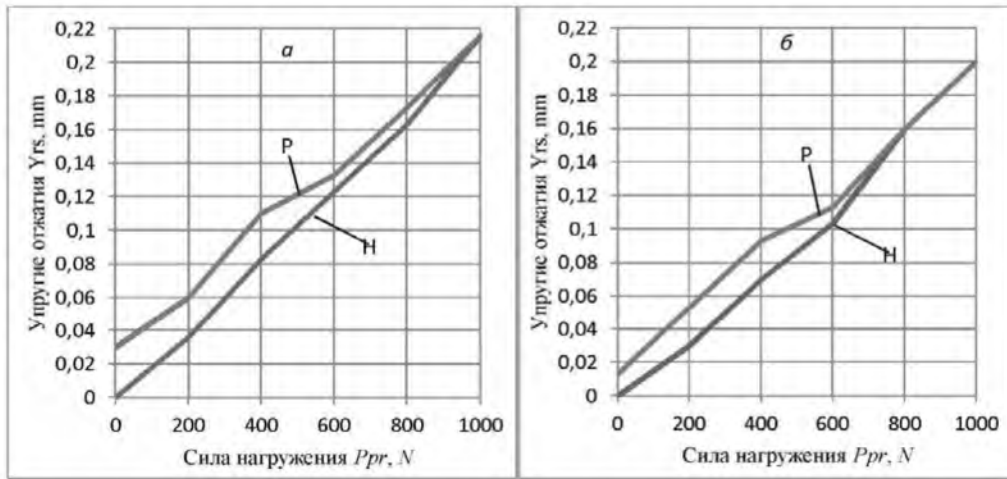
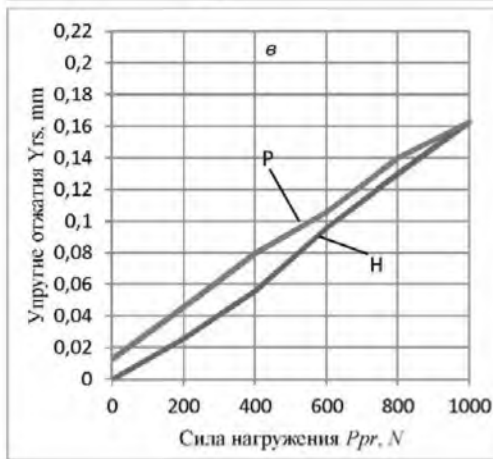


Рис. 12 – График зависимости радиальной жесткости j_r от давления зажима p_c

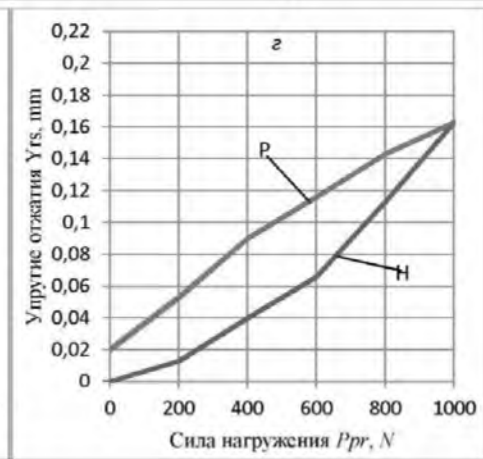


а

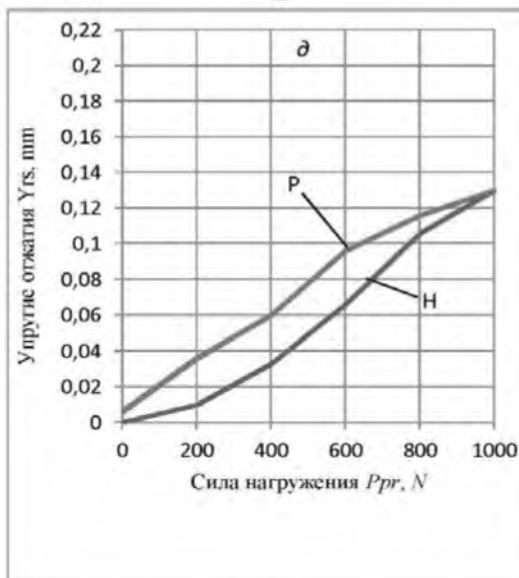
б



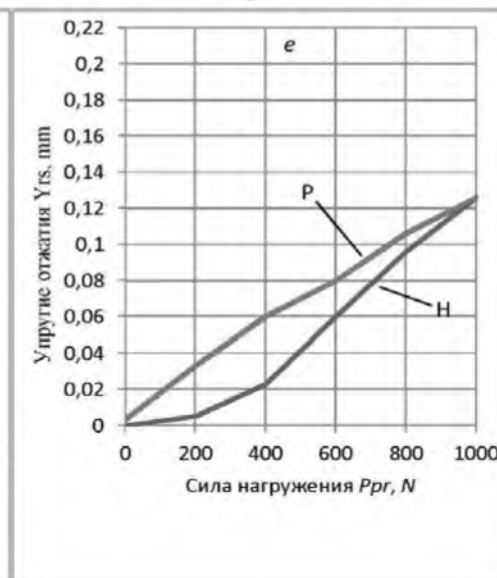
в



г



д



е

Рис. 13 – Графики зависимости упругих отжатий Y_{rs} от силы P_r при нагружении и разгрузении: а – $p_c = 10 \text{ MPa}$; б – $p_c = 20 \text{ MPa}$; в – $p_c = 30 \text{ MPa}$; г – $p_c = 40 \text{ MPa}$; д – $p_c = 50 \text{ MPa}$; е – $p_c = 60 \text{ MPa}$.

Свыше представленных графиков видно, что силовые и жесткостные характеристики патрона прямо зависят от давления зажима (силы зажима), а значит следует – чем больше давление, тем они выше и патрон надежнее.

Выводы. Результаты выполненных экспериментов и построенных зависимостей показали, что силовые и жесткостные характеристики ИЗП типа CoroGrip напрямую зависят от давления зажима оправки (инструмента) в гидроцилиндре патрона, а следовательно, при увеличении силы зажима влияние центробежных сил будут уменьшаться. Из графиков видно, что при увеличении силы зажима (давления зажима) повышается жесткостные характеристики. Из эксперимента четко видно, что при различных методах проверки коэффициент усиления остается тот же, что свидетельствует о достоверности эксперимента.

Список литературы: 1. *Вейц, В. Л.* Электромеханические зажимные устройства станков и станочных линий. Расчет и конструирование [Текст] / *В. Л. Вейц, Л. И. Фридман.* – Л.: Машиностроение, 1973. – 262 с. 2. *Фіранський, В. Б.* Пружно-напружений стан інструментально затискних патронів нової конструкції [Текст] / *В. Б. Фіранський* // Збірник наукових праць "Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" серія машинобудування.-2010. - Вип. 59.- С. 19-23. 3. *Hasan, Al Dabbas.* A Study of Efficiency Eccentric Drilling-Milling Chuck / *Hasan, Al Dabbas* // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2015. - Vol. 3, No. 1. – P. - 5-8. 4. *Кузнецов, Ю. М.* Принципи створення інструментальних прецизійних затискних патронів для високошвидкісної обробки [Текст] / *Ю. М. Кузнецов, О. А. Гуменюк, А. М. Рудковський, Хасан Аль-Дабас* //Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету.-2006. - Вип.17. - С. 134-141. 5. *Кузнецов, Ю. М.* Системно-морфологический подход при синтезе высокоскоростных зажимных патронов [Текст] / *Ю. М. Кузнецов, Аль-Дахаби Фарук* //Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного ун-ту. – 2004. - №15. – С. 388-398. 6. *Кузнецов, Ю. М.* Експериментальні дослідження високошвидкісного інструментального затискного патрону з пружним елементом затиску [Текст] / *Ю. М. Кузнецов, В. Б. Фіранський, О. В. Грисюк, В. Н. Волошин* //Вісник ХНТУСГ. – 2008. - №45. – С. 294-299. 7. *Кузнецов, Ю. Н.* Расчет и экспериментальные исследования силовых характеристик высокоскоростного инструментального зажимного патрона [Текст] / *Ю. Н. Кузнецов, В. А. Недобой, Герра Ж. А. Хамуйела* // International Scientific Conference "UNITECH '13" - Gabrovo, UNITECH-2013. 8. *Кузнецов, Ю. М.* Високоточні надшвидкісні патрони для хвостового різального інструменту [Текст] / *Ю. М. Кузнецов, О. А. Гуменюк* //Вісник НТУУ "КПІ", серія машино-будування.-2004.- № 45.- С. 80-83. 9. *Кузнецов, Ю. Н.* Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием: Монография [Текст] / *Ю. Н. Кузнецов, В. Н. Волошин, П. М. Неделчева, Ф. В. Эль-Дахаби; Под ред. Ю.Н. Кузнецова.* – Габрово. Ун. изд-во «Васил Априлов», 2010. – 724 с. 10. *Кузнецов, Ю. Н.* Инструментальные зажимные патроны: Монография [Текст] / *Ю. Н. Кузнецов, В. Н. Волошин, В. Б. Фіранський, О. А. Гуменюк; Под ред. Ю. Н. Кузнецова* - К. ООО "ГНОЗИС", 2012. -286 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Weitz V., Friedman, L.* (1973). Electromechanical clamping devices of machine tools and machining lines. Calculation and design. L.: Mechanical, 262. [in USSR] 2. *Firansky, V.* (2010). Elastic stress state instrumentally Chuck new design. Collected Works "Proceedings of the National Technical University of Ukraine" Kyiv Polytechnic Institute "series engineering, 59, 19-23. [in Ukrainian] 3. *Hasan, Al Dabbas.* (2015). A Study of Efficiency Eccentric Drilling-Milling Chuck / International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, vol. 3, no. 1, 5-8. [in USA] 4. *Kuznetsov, Y., Gumenyuk, O., Rudkovsky, A., Hassan Al-Dabas.* (2006). Principles of creation of instrumental precision chuck for high-speed processing // Scientific Papers of Kirovograd National Technical university, 17, 134-141 [in Ukrainian] 5. *Kuznetsov, Y., Hassan, Al-Dabas.* (2004).

System-morphological approach in the synthesis of high-speed chucks. Scientific Papers of Kirovograd National Technical University, 15, 388-398 [in Ukrainian] 6. Kuznetsov, Y., Firansky, V., Grysyuk, A., Voloshin, V. (2008). Experimental studies of high-speed tool chuck with elastic clamping element. Bulletin KNTUA, 45, 294-299. [in Ukrainian] 7. Kuznetsov, Y., Nedoboi, V., Guerra, J. A. (2013). Hamuyela. Calculation and experimental study performance power of high-speed tool chuck. International Scientific Conference "UNITECH '13" - Gabrovo, UNITECH-2013. [in Bulgarian] 8. Kuznetsov, Y., Gumeniuk, O. (2004). Precision superfast ammunition for tail cutting tools. Journal "KPI" , a series of machine-building, 45, 80 - 83. [in Ukrainian] 9. Kuznetsov, Y., Voloshin, V., Nedelcheva, P., El-Dahab, F. (2010). The clamping mechanism for high-performance and high-precision machining: Monograph. Ed. red Y. Kuznetsova. Gabrovo. Un. publishing house "Vasil Aprilov", 724. [in Bulgarian] 10. Kuznetsov, Y., Voloshin, V., Firansky, V., Gumeniuk, O. (2012). Tool chucks: Monograph. Ed. Y. Kuznetsova. K. LLC "Gnosis", 286. [in Ukrainian]

Надійшла (received) 17.12.2014

УДК 661.32(04)

В. Ф. РАЙКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
М. А. ЦЕЙТЛИН, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

РАСТВОРИМОСТЬ ОТЛОЖЕНИЙ ГИДРОКАРБОНАТА НАТРИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В КОЛОННАХ КАРБОНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ

Проведено исследование растворимости в аммонизированном карбонизованном растворе хлорида натрия отложений NaHCO_3 из карбонизационных колонн производства кальцинированной соды. Установлено, что на количество растворившегося NaHCO_3 влияет, главным образом, исходная концентрация карбонатных ионов в растворе, а также температура, степень влияния которой ослабевает с ростом концентрации аммиака.

Ключевые слова: растворимость, недосыщение, гидрокарбонат натрия, аммонизированный рассол, карбонатные отложения.

Введение. Процесс получения кальцинированной соды по аммиачному способу, несмотря на почти двухсотлетнюю историю, все еще уверенно конкурирует с альтернативными технологиями. В то же время, его основная стадия – карбонизация водного раствора хлорида натрия, насыщенного аммиаком (аммонизированного рассола) остается недостаточно изученной из-за большой сложности протекающих на ней физико-химических процессов.

Существующая технологическая схема этой стадии [1] предусматривает последовательную обработку охлажденного до $30\text{ }^\circ\text{C}$ аммонизированного рассола в колонне предварительной карбонизации (КЛПК), промывателе газа колонн (ПГКЛ-1) и собственно продукционной колонне (КЛ) газом, содержащим диоксид углерода. КЛПК не является специальным аппаратом. Периодически продукционная колонна переводится в режим КЛПК для отмывки образовавшихся отложений гидрокарбоната натрия. В КЛПК также как и в КЛ подается газ известковых печей, содержащий 32-40 % (объемных) диоксида углерода. Перемешивая жидкость в этом аппарате, газ способствует растворению осадков и в то же время обеспечивает предварительную карбонизацию аммонизированного рассола.

© В. Ф. РАЙКО, М. А. ЦЕЙТЛИН, 2014

Условия ведения процесса в КЛПК должны быть таковы, чтобы обеспечить отмывку колонны от накопившихся в ней отложений за время ее работы в режиме КЛ. В настоящее время эти условия подобраны эмпирическим путем, а их рациональное обоснование осложнено отрывочностью информации о равновесии и кинетике растворения отложений.

Цель работы. Цель работы состоит в исследовании растворимости отложений гидрокарбоната натрия в карбонизованном аммонизированном рассоле в условиях, имеющих место в колоннах предварительной карбонизации содового производства.

Литературный обзор. Отложения на внутренних поверхностях карбонизационных колонн, которые в практике содового производства принято называть «пасетным бикарбонатом», образуются в процессе работы в производственном режиме и по химическому составу представляют собой гидрокарбонат натрия с небольшой примесью (до 5 %) карбоната натрия. Последний, по-видимому, образуется при взаимодействии гидрокарбоната натрия с гидроксидом аммония во время работы в режиме КЛПК и накапливается из-за неполной промывки колонны от отложений.

Пасетный бикарбонат, как следует из отчета [2] и собственных наблюдений авторов, по своим физико-механическим свойствам существенно отличается от технического гидрокарбоната натрия. Последний, как известно, представляет собой рыхлую, пушистую массу, пасетный бикарбонат – твердую стекловидную массу слоистого строения, которая плотно выстилает внутренние поверхности колонн и с трудом снимается со стенок.

Кинетика растворения пасетного бикарбоната, как, впрочем, и любого другого твердого вещества зависит [3, 4] от гидродинамических условий и удаленности раствора от насыщения (недосыщения). То есть от разности концентраций растворяемого вещества в насыщенном растворе – C^* и его фактической концентрации в растворителе – C . Для ее вычисления в нашем случае необходимы сведения о равновесии в системе твердый гидрокарбонат натрия – аммонизированный, карбонизованный раствор хлорида натрия (аммонизированный рассол).

Равновесие между гидрокарбонатом натрия и аммонизированным рассолом, хорошо изучено [5] только в условиях соответствующих конечным стадиям этого процесса. Экспериментальные исследования растворимости гидрокарбоната натрия в аммонизированном, карбонизованном растворе на начальных стадиях карбонизации носят отрывочный характер. Так в работе [6] имеются сведения о системе $\text{Na}^+ - \text{NH}_4^+ - \text{Cl} - \text{CO}_3^{2-} - \text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$. Это исследование интересно тем, что кроме обычных полей кристаллизации $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, NaCl и NH_4Cl в указанной системе обнаружено и поле кристаллизации $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, что может быть одним из объяснений наличия в отложениях на стенках карбонизационных колонн, наряду с гидрокарбонатом, карбоната натрия [7, 8]. Однако равновесие в этой работе изучено в условиях, которые по температуре и степени карбонизации отличаются, от имеющих место в КЛПК.

Опыты по изучению растворимости пасетного и технического гидрокарбоната проводились авторами отчета [2] при температурах 40 и 50 °С. При этом найдено, что равновесная концентрация карбонат-иона при равновесии

жидкости КЛПК и твердого гидрокарбоната натрия составляет 3,20-3,25 моль/дм³ и мало зависит от температуры. Последнее обстоятельство вызывает определенное сомнение и, скорее всего, обусловлено небольшим интервалом температур, в котором проводилось исследование.

В работах [8, 9] предложена методика расчета разности $\Delta C = C^* - C$ для аммонизированного карбонизованного раствора гидрокарбоната натрия, которую авторы назвали «недосыщением». Следует отметить, что найденная по этой методике величина недосыщения является равновесной. Равновесие в жидкости КЛПК, как известно [9], склонной к метастабильности, устанавливается лишь за несколько десятков часов. За время пребывания жидкости в КЛПК, не превышающее получаса, оно не устанавливается, а, следовательно, результат расчета ΔC будет завышенным.

Авторами отчета [2], наряду со статикой, исследовалась кинетика растворения пассивного и технического гидрокарбоната при температуре 40 и 50 °С. Интерес в этой работе представляет выявленная особенность кривых зависимости количества гидрокарбоната натрия, перешедшего в раствор, от времени. На них можно выделить два участка: «быстрого» растворения, длящегося около 0,5 ч, и «медленного» растворения, когда в течение десятков часов количество вещества, перешедшего в раствор, медленно нарастает с постоянной скоростью. Наличие области «медленного растворения» естественно связать со сравнительно медленным переходом гидрокарбонат-ионов в карбонат и карбамат-ион. В литературе по технологии соды [1] растворы с неустановившимся равновесием между указанными ионами принято называть «метастабильными». Следуя этой традиции растворы, образовавшиеся после окончания «быстрого растворения», мы будем называть метастабильными, а достигнутую в этой фазе концентрацию гидрокарбоната натрия метастабильной растворимостью этого вещества.

Методика экспериментов. В экспериментальной части работы исследовалось влияние температуры и состава раствора, в частности, суммарных концентраций соединений азота в пересчете на аммиак (далее – NH₃ общий) и углерода в пересчете на диоксид углерода (далее – CO₂ общий), а также хлорид-иона, на метастабильное недосыщение аммонизированного рассола гидрокарбонатом натрия (далее – недосыщение). Под термином «недосыщение» мы, также, как в работе [7], будем понимать разность $C^* - C = \Delta C$, то есть количество молей NaHCO₃, которое может быть растворено в 1 дм³ аммонизированного рассола данного состава до достижения насыщения.

Интерес именно к метастабильной растворимости NaHCO₃ в настоящем исследовании вызван тем, что из-за краткости пребывания раствора в КЛПК растворение гидрокарбоната натрия в «медленной области» можно игнорировать и рассматривать его метастабильную концентрацию, достигаемую в «быстрой» области как предельную.

Экспериментальная установка представляла собой закрытый пробкой термостатированный стакан, снабженный мешалкой, а также воронкой с краном для залива жидкости, пробоотборником и термометром. Кроме того, в стакан помещали барботер для подачи диоксида углерода при исследовании растворения с карбонизацией.

Исследование метастабильной растворимости гидрокарбоната натрия проводили путем растворения в аммонизированном рассоле извлеченных из колонны и размолотых отложений. В качестве растворителя использовали заводской аммонизированный рассол, который для некоторых опытов корректировали до требуемых концентраций путем карбонизации и, при необходимости, добавления гидроксида аммония.

Методика проведения опыта была следующей. В стакан, выдержанный при температуре, заданной программой исследований, вливали предварительно нагретый аммонизированный рассол заданного состава и включали мешалку. В отдельных опытах в барботер подавали диоксид углерода для лополнительной карбонизации раствора. После подготовки раствора в него всыпали молотый пачетный бикарбонат в количестве, значительно превышающем возможную растворимость. Опыт длился заданное программой время, в течение которого через определенные интервалы отбирали пробы жидкости на анализ. После завершения опыта раствор сливали и подвергали химическому анализу. Также анализировали отобранные в течение опыта пробы.

Обсуждение результатов исследования. Опыты показали (рис. 1) существенный рост недосыщения раствора с ростом температуры (в 2,5 - 4 раза в интервале 30 - 60 °С). Влияние концентрации аммиака на недосыщение зависит от температуры и становится заметным лишь выше 40 °С. Так, при $[\text{NH}_3]_{\text{общий}} = 4,9$ моль/дм³ увеличение растворимости с ростом температуры на 1 °С составляет в среднем 0,016 моль/ дм³, а при $[\text{NH}_3]_{\text{общий}} = 3,0$ моль/дм³, соответственно, 0,08 моль/дм³.

Эту закономерность можно объяснить реакцией гидрокарбонат-иона с избытком свободного аммиака, приводящей к образованию карбамат-иона. Реакция эта протекает достаточно медленно и при температуре 30 - 40 °С не оказывает существенного влияния на растворимость NaHCO_3 которая в указанном температурном диапазоне близка к растворимости в рассоле с соответствующей концентрацией хлорида натрия. При повышении температуры эта реакция протекает уже заметным образом, что приводит к снижению концентрации гидрокарбонат-иона и, соответственно, повышению растворимости гидрокарбоната натрия.

Исследование влияния концентрации диоксида углерода на недосыщение проводились при исходной концентрации в растворе $[\text{NH}_3]_{\text{общий}} = 5 \pm 0,1$ моль/дм³, соответствующей требованиям регламента к аммонизированному рассолу. Опыты показали (рис. 2), что в диапазоне концентрации $[\text{CO}_2]_{\text{общий}} = 0,6-0,9$ моль/дм³, соответствующем нормальным, допускаемым регламентом, колебаниям этой величины в аммонизированном

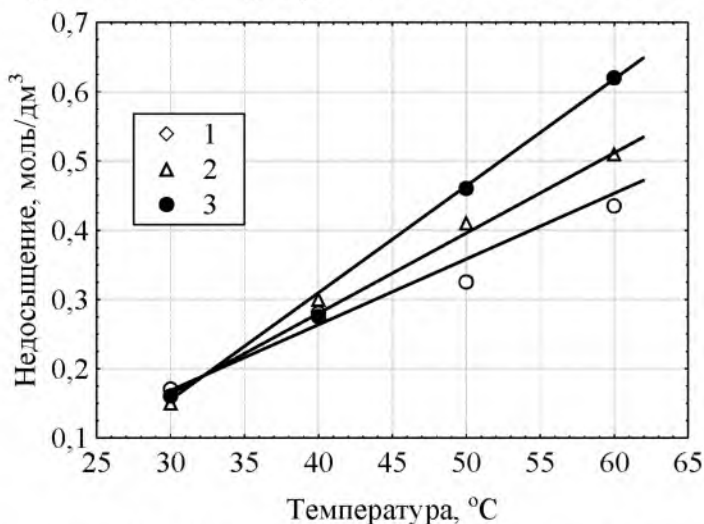


Рис. 1 – Зависимость недосыщения от температуры при $R = 33$ % и концентрации аммиака, моль/дм³: 1 – 3,1; 2 – 3,7; 3 – 5,0

рассоле, величина недосыщения при температурах от 30 до 60 °С практически не зависит от концентрации $[\text{CO}_2]_{\text{общий}}$. Этого результата, собственно, и следовало ожидать с точки зрения карбаматной теории углеаммонийных растворов [10], так как в указанном концентрационном интервале практически весь углерод в аммонизированном рассоле связан в виде карбамата аммония и изменение концентрации этой соли, не поставляющей в раствор гидрокарбонат ионов, не должно оказывать влияния на рассматриваемую растворимость.

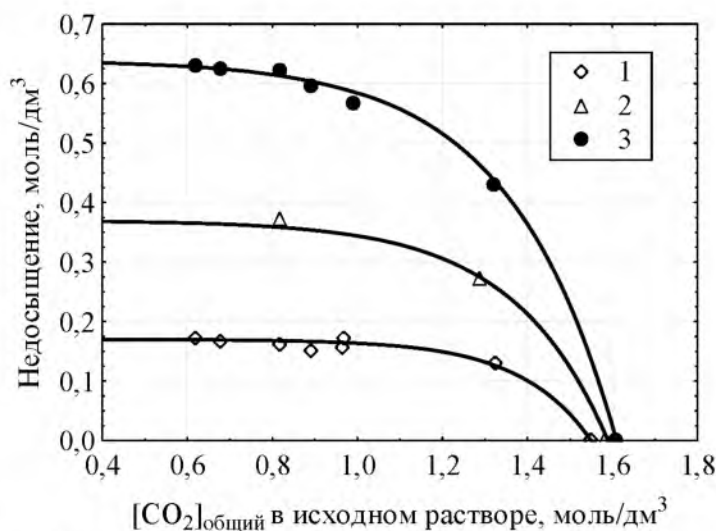


Рис. 2 – Зависимость недосыщения от концентрации $[\text{CO}_2]_{\text{общий}}$ в растворе при $[\text{NH}_3]_{\text{общий}} = 5$ моль/дм³ и температуре, °С: 1 – 30; 2 – 45; 3 – 60

Следующая серия опытов выполнялась в интервале концентраций диоксида углерода в аммонизированном рассоле $[\text{CO}_2]_{\text{общий}} - 1,0-1,6$ моль/дм³, соответствующем изменению этой величины в процессе карбонизации в КЛПК. Было найдено, что при 30 °С недосыщение почти не зависит от $[\text{CO}_2]_{\text{общий}}$ при росте этой величины от 1,0 до 1,3 моль/дм³, а при дальнейшем увеличении быстро снижается до нуля. При 60 °С влияние $[\text{CO}_2]_{\text{общий}}$ выражено более сильно, однако концентрация диоксида углерода общего, при которой растворение NaHCO_3 прекращается от температуры почти не зависит и составляет 1,55 моль/дм³ при 30 °С и 1,62 моль/дм³ при 60 °С. Таким образом, вне зависимости от температуры жидкости, выходящей из КЛПК, для обеспечения процесса промывки концентрация диоксида углерода в ней не должно превышать 1,5 моль/дм³.

Результаты исследования зависимости недосыщения от состава раствора и температуры были обобщены в виде следующей зависимости.

$$\Delta C = a_1 \{1 - \exp[-a_2(a_3 - [\text{CO}_2]_{\text{общий}})]\}, \quad (1)$$

где $a_1 = 0,19 - [\text{NH}_3]_{\text{общий}}(0,1 - 0,0031t)$; $a_2 = 4,5$; $a_3 = 1,48 + 0,0023t$

О точности формулы (1) можно судить по тому, насколько близко к экспериментальным точкам проходят линии на рис. 2, которые представляют собой построенные по этой формуле графики. Видно, что, как по степени совпадения с экспериментом, так и по тенденциям изменения формула хорошо отражает описываемую величину. Объективными критериями точности расчета являются коэффициент корреляции между расчетом и экспериментом равный 0,992 и остаточная среднеквадратическая ошибка расчета – 0,07 моль/дм³.

Выводы. Количество гидрокарбоната натрия, переходящего в аммонизированный раствор хлорида натрия при растворении отложений, образовавшихся в карбонизационных колоннах (недосыщение) в зависимости от температуры и концентрации аммонийных соединений колеблется от 0,18 моль/дм³

при 30 °С и 2 моль/дм³ аммонийных соединений в пересчете на аммиак до 0,62 моль/дм³ при 60 °С и 5 моль/дм³ аммиака. При этом влияние суммарной концентрации аммонийных соединений на растворимость гидрокарбоната натрия сказывается лишь при температуре выше 40°С.

На растворимость NaHCO₃ также оказывает влияние суммарная концентрация карбонатных соединений и карбамата в растворе. Однако, существенным оно становится лишь при величинах близких к 1,5-1,6 моль/дм³, соответствующих прекращению растворения гидрокарбоната натрия. В интервале суммарной концентрации карбонатных соединений и карбамата в пересчете на CO₂ от 0,6 до 0,9 моль/дм³ влияние этого фактора не выявлено. Таким образом, вне зависимости от температуры жидкости для обеспечения процесса растворения отложений NaHCO₃ суммарная концентрация диоксида углерода в ней не должно превышать 1,5 моль/дм³

Список литературы: 1. *Ткач, Г. А.* Производство соды по малоотходной технологии [Текст] / *Г. А. Ткач, В. П. Шапоров, В. М. Титов* – Харьков: ХГПУ, 1998.– 429 с. 2. *Кириченко, Н. Е.* Перевод серии карбонизационных колонн завода Донсода на работу с форкарбонизацией [Текст] / *Н. Е. Кириченко, А. В. Ляхович* // Научно-технический отчет ВИСП – Харьков: Фонд НИОХИМ.– 1947 - 29 с. 3. *Куликов, Б. А.* Расчет скорости диффузионных процессов растворения бинарных ионно-ковалентных кристаллов с учетом ассоциации ионов в пограничном диффузионном слое [Текст] / *Б. А. Куликов, Е. Б. Лось, Н. В. Куликова* // Журн. физ. химии, 2001. – Т. 75. – № 2. – С. 267-270. 4. *Майструк, І. М.* Інтенсифікація процесів розчинення у трифазній системі при вакуумуванні: Автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.17.08 [Текст] / Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – Львів, 2000. – 19 с. 5. *Федотьев, П. П.* Аммиачносодовый процесс с точки зрения учения о фазах [Текст] / *П. П. Федотьев* // Сб. исследовательских работ. - М.: ОНТИ, 1936. - С. 7-43. 6. *Бердюкова, В. А., Система Na⁺ – NH₄⁺ – Cl – CO₃²⁺ – NH₃ – H₂O при 20 °С.* [Текст] / *В. А. Бердюкова, Е. А. Григорьева, С. С. Лопатин* // Журн. неорг. хим. - 1937– Т. 32, № 12. –С. 3090-3094. 7. *Панов, В. И.* Скорость растворения отложений бикарбоната натрия в жидкости колонны предкарбонизации [Текст] / *В. И. Панов, А. Н. Карпенко* // Хим. промышленность. – 1966. – № 11. – С. 841-844. 8. *Цейтлин, М. А.* Упрощенный метод расчета состава жидкой фазы в системе NH₃ – CO₂ – H₂O – NaCl [Текст] / *М. А. Цейтлин, Н. А. Цейтлин* // Химическая технология. – 1979. – № 6.– С. 12-13. 9. *Rod, V.* Simultaneous absorption of carbon dioxide and ammonia in a packed column. [Text] / *V. Rod, M. Rylek* // Collection Czechoslov. Chem. Commun. – 1974. – V. 39. – P. 1996-2006. 10. *Faurholt, C.* Über das Ammonium – Karbonat – Karbaminat – Gleichgewicht. [Text] / *C. Faurholt* // Z. Anorg. Ch. – 1922.- B. 122. – S. 45-48.

Bibliography (transliterated): 1. *Tkach, G. A., Shaporev, V. P., Titov, V. M.* (1998). Proizvodstvo sody po maloethodnoj tehnologii. Karkov: HGPU. 2. *Kirichenko, N. E. Ljahovich, A. V.* (1947)Perevod serii karbonizacionnyh kolonn zavoda Donsoda na rabotu s forkarbonizaciej. Khar'kov: VISP: Fond NIOKhim. 3. *Kulikov B. A., Los', E. B. Kuli-kova N. V.* (2001). Raschet skorosti diffuzionnyh processov rastvorenija binarnyh ionno-kovalentnyh kristallov s uchetom asociacii ionov v pogranichnom diffuzionnom sloe. Zhurn. fiz. himii, V. 75, 2, 267-270. 4. *Majstruk, I. M.* (2000) Intensifikacija procesiv rozchinennja u trifaznij sistemi pri vakuumuvanni. Avtoref. dis. ...kand. tehn. nauk. L'viv: Nac. un-t “L'viv'ska politehnika”, 19. 5. *Fedot'ev, P. P.* (1936). Ammiachnosodovoj process s točki zrenija uchenija o fazah. Sb. issledovatel'skih rabot, Moskov: ONTI, 7-43. 6. *Berdjukova, V. A., Grigor'eva, E. A., Lopatin, S. S.* (1937). Sistema Na⁺ – NH₄⁺ – Cl – CO₃²⁺ – NH₃ – H₂O pri 20 °С. Zhurn. neorg. him, V. 32, 12, 3090-3094. 7. *Panov, V. I. Karpenko, A. N.* (1966) Skorost' rastvorenija otlozhenij bikarbonata natrija v zhidkosti kolonny predkarbonizacii. Him. promyshlennost', 11, 841-844. 8. *Tseitlin, M. A. Tseitlin, N. A.* (1979) Uproshhennyj metod rascheta sostava zhidkoj fazy v sisteme NH₃ – CO₂ – H₂O – NaCl. Himicheskaja tehnologija, 6, 12-13. 9. *Rod, V. Rylek, M.* (1974). Simultaneous absorption of carbon dioxide and ammonia in a packed column. Collection Czechoslov. Chem. Commun, V. 39, 1996-2006. 10. *Faurholt, C.* (1922) Über das Ammonium – Karbonat – Karbaminat – Gleichgewicht. Z. Anorg. Ch., B. 122, 45-48.

Надійшла (received) 17.12.2014

ГІДРОСТАТИЧНИЙ СФЕРИЧНИЙ ОПОРНИЙ ВУЗОЛ ПОВОРОТНОГО СТОЛА ІЗ СТРУМЕНЕВИМ ПРИВОДОМ МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ

Розроблено схемне і конструктивне рішення опорного вузла поворотного стола, обґрунтовано метод струменевого регулювання положення сфери, проведені дослідження гідродинамічних процесів у гідростатичних опорах із струменевим регулюванням. Визначено силові характеристики регульованого сферичного опорного вузла в цілому. Підтверджена можливість конструктивної реалізації регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла, який забезпечує сприйняття статичних зусиль до 5кН при стабільності положення сфери в межах 0,1...0,4 мкм та регулювання положення сфери в межах $\pm 0,1$ мкм.

Ключові слова: сфера, вузол, гідростатика, регулювання, струмінь, характеристика

Вступ. Розробка систем приводів високої точності є актуальною науковою проблемою. Проблема в загальному вигляді полягає у розробці конструктивних заходів по підвищенню точності просторової системи приводів. Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями створення прогресивного технологічного обладнання.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведено результати розробки прогресивного обладнання на основі просторових систем приводів з паралельними кінематичними зв'язками [1]. В публікаціях наведені схемні рішення та описана елементна база просторових систем приводів [2]. Вказано, що основним вузлом просторових систем приводів є сферичні шарніри [3]. Наведені в літературних джерелах дані [4,5] підтверджують ефективність використання гідростатичних опор в просторових системах приводів.

Із аналізу літературних джерел випливає, що невирішеною раніше частиною загальної проблеми є розробка регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла.

Мета роботи. Метою досліджень викладених в даній статті є розробка регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла на якому встановлено стіл технологічного обладнання

Виклад основного матеріалу досліджень. Гідростатичний сферичний опорний вузол поворотного стола використано у верстаті з паралельними кінематичними зв'язками. Верстат має високо обертовий шпindel 1 встановлений на платформі 2, яка має шість штанг 3 змінної довжини (рис. 1).

Поворотний стіл 4 встановлений на сферичному опорному вузлі 5 і має просторову систему приводів 6.

Сферичний опорний вузол призначено для повороту стола в просторі в кутовому діапазоні $\pm 22,5^\circ$. Конструкція регульованого опорного вузла забезпечує мікропереміщення стола в діапазоні $\pm 0,1$ мм. Це дозволяє суттєвим чином підвищити точність позиціонування інструменту відносно стола.

Розроблений регульований сферичний опорний вузол має нерухомий корпус 1 (рис. 2). З корпусом з'єднана кришка 2, яка має гвинтові приводи 3,4 для її установочного просторового переміщення відносно корпусу Корпус і кришка

мають порожнину у вигляді ділянок точних сферичних поверхонь, які охоплюють рухому сферу 5.

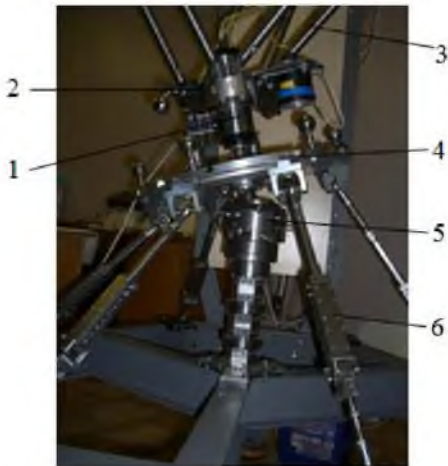


Рис. 1 – Верстат паралельної кінематики з поворотним столом встановленим на сферичному гідростатичному опорному вузлі

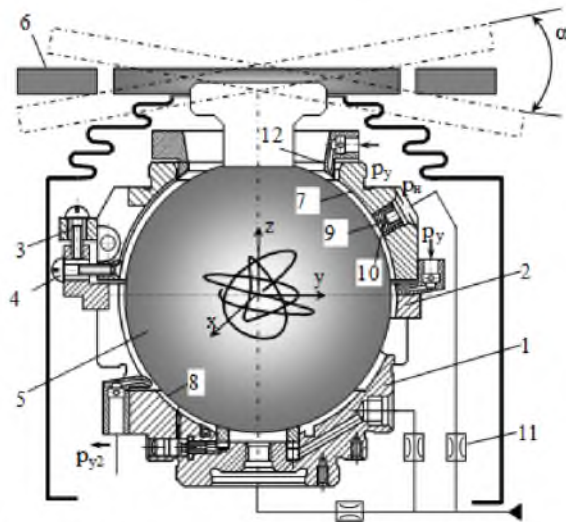


Рис. 2 – Принципова схема сферичного гідростатичного опорного вузла, який забезпечує додаткові мікропереміщення стола

Рухома сфера з'єднана із столом 6, який має зовнішні приводи для зміни його просторового положення. Рухома сфера встановлена в корпусі і кришці на гідростатичних опорах. Опори 7, 8 розташовані регулярним чином навколо рухомої сфери. Опори мають кармани 9, в які через дроселі 10, 11 подається робоче середовище.

Опори мають по своїй периферії систему соплових пристроїв, які виконані в колекторі 12, які служать для гідродинамічного запирання щілини на виході гідростатичної опори [7]. Сферичний опорний вузол реалізовано з використанням сучасних методів технології машинобудування. Корпус 1 і кришка 2 мають ділянки сферичних поверхонь у вигляді сферичного пояса 3 та трьох сферичних секторів 4 (рис. 3).

Рухома сфера 5 опорного вузла виконана збірною. Вона має дві окремі деталі із точними сферичними поверхнями 6 і 7. Дані сферичні поверхні виконані на верхній і нижній половинах рухомої сфери та узгоджені між собою при збиранні, утворюючи одну точну сферичну поверхню. Забезпечення точності даної поверхні здійснюється підгонкою базуючих і центруючих поверхонь в з'єднанні верхньої і нижньої половин рухомої сфери.



Рис. 3 – Основні деталі виготовленого опорного вузла та ділянки точних сферичних поверхонь деталей

Сопла для струменевого регулювання положення сфери та комунікації виконані в спеціальному колекторі виготовленому методом лазерної стереолітографії (рис. 4, а, б, в).

Сопла мають криволінійні канали, а вісі вихідних отворів розташовані під гострим кутом γ до поверхні сфери (рис. 4, б).

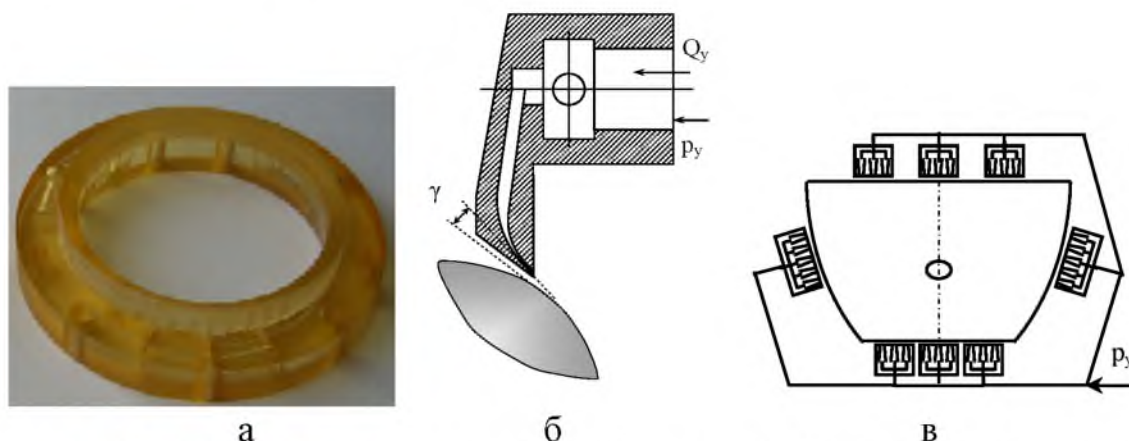


Рис. 4 – Струменева система регулювання реакції гідростатичної опори: а – колектор, в якому виконана система комунікацій, б - конфігурація соплового пристрою; в - схема розташування сопел по периферії сферичного сектора

При підводі рідини під тиском p_H з витратою Q до опори в щілині утвореній сферичним сектором та сферою на ділянці АВ формується трапецієвидна [6] епюра тиску p_{S0} (рис. 5, а).

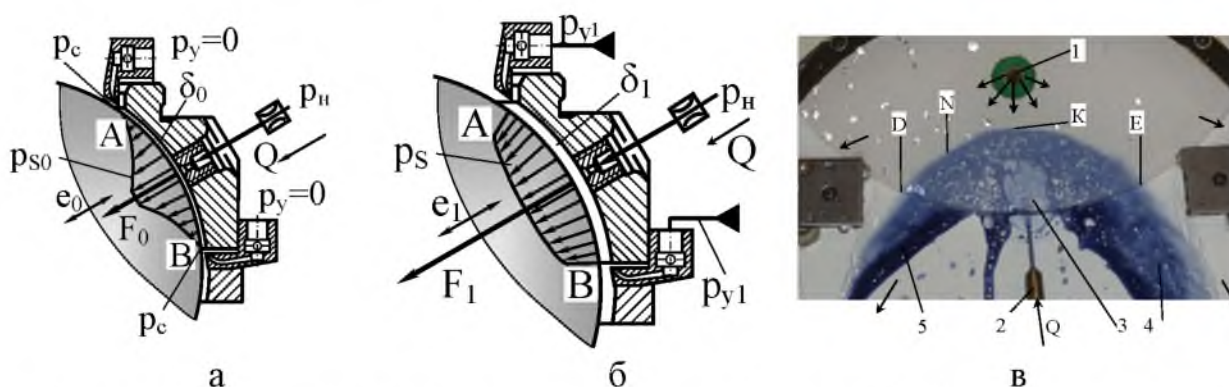


Рис. 5 – Зміна епюр тиску та навантаження в перетині щілини опори при попаданні в щілину струменів робочого середовища: а – епюра тиску при відсутності керуючих струменів; б – епюра тиску при гідродинамічному запиранні щілини; в - фото візуалізованої течії в щілині макета гідростатичної опори

При цьому встановлюється деякий рівноважний зазор δ_0 та сумарне зусилля тиску в опорі F_0 . При подачі робочого середовища під тиском p_{y1} в соплові пристрої в перерізі щілини (точки А, В) формується область підвищеного тиску (рис. 5, б). Епюра тиску в щілині буде залежати від тиску на виході щілини. Гідродинамічне запирання виходу щілини підвищує тиск p_c на ділянках А і В та робить епюру тиску p_s більш опуклою. При цьому збільшується опорна реакція F_1 та величина зазору δ_1 .

Для встановлення особливостей гідродинамічних процесів у щілині гідростатичної опори проведені спеціальні теоретичні та експериментальні дослідження. Експериментальні дослідження проведені на прозорому макеті гідростатичної опори виконаному в масштабі 10:1. При цьому рідина, яка витікає із сопла і попадає в щілину була підфарбована. В результаті досліджена форма і глибина проникнення струменя в щілину (рис. 5, в).

Рідина до щілини в макеті опори підводиться через отвір 1. Керуючий струмінь формується в соплі 2 і натікає на поверхню опори утворюючи вхідний потік 3. Рідина, що підводиться до сопла підфарбована тому вхідний потік 3 і вихідні потоки 4, 5 мають інший колір ніж прозора рідина, що витікає із отвору 1. Форма області яку займає керуючий струмінь (лінія ДКЕ) в щілині опори відповідає параболі, форма якої залежить від витрати рідини Q в сопловому пристрої.

Теоретичні дослідження течії рідини в щілині, в яку втікає пристінний струмінь рідини, проведені методом ламінарної аналогії [8]. Згідно даного методу лінії течії повільного руху в'язкої течії в щілині співпадають із лініями течії плоскої потенціальної течії ідеальної рідини.

Рідина до щілини гідростатичної опори підводиться через отвір. В опорі наявний ряд керуючих струменів розташованих по периферії щілини. Тому течія рідини в щілині визначена як суперпозиція $n+1$ джерел з витратами Q_k , де n – загальне число керуючих струменів. При цьому функція течії буде визначена залежністю [9]:

$$\psi_3 = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{y - y_k}{x - x_k} \right). \quad (1)$$

Контур L периферії щілини обмежує область W . Координати отвору підводу рідини x_0, y_0 знаходиться в центральній частині області W , а точки розташування джерел (x_k, y_k) $k=1, 2, \dots, n$ знаходяться на контурі L .

Проекції середніх швидкостей частинок рідини визначені шляхом диференціювання функції течії [9] визначеній формулою (1) і складають:

$$V_x = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \cdot \frac{(x - x_k)}{\left[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 \right]}, \quad V_y = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \cdot \frac{(y - y_k)}{\left[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 \right]}. \quad (2)$$

Одержані залежності (2) визначають поле середніх швидкостей в щілині гідростатичної опори. Характерною областю течії в щілині є критична точка взаємодії струменя із основним потоком. Розрахункові профілі проекцій швидкостей в околиці критичної точки мають особливість (рис. 6, а, б).

Струмені формуються в соплах M . На виході сопл формуються круглі струмені, які під гострим кутом попадають на рухому поверхню s сфери (рис. 6). При взаємодії круглого струменя із плоскою поверхнею утворюється струмінь C прямокутного перетину (перетини Π_1, Π_2). В прямокутному перетині профіль швидкостей струменя близький до рівномірного із утворенням граничного шару на стінці s . При розповсюдженні прямокутного струменя вздовж стінки сфери він деформується і товщина граничного шару біля стінки збільшується. Тому в перетині Π_2 прямокутний струмінь має згладжений профіль швидкостей.

Взаємодія пристінного струменя із входом в щілину супроводжується

утворенням витікаючого потоку V . Звичайно він розповсюджується вздовж торця щілини T . Якщо розмір щілини δ більше розміру струменя C в 1.5 і більше разів, витікаючий потік буде направлений протилежно пристінному струменю [6].

На деякій відстані від торця (перетин Π_3) у щілині встановлюється течія рідини з асиметричним розподілом швидкостей. При подальшому розповсюдженні струменя в щілині профіль швидкостей вирівнюється і в деякому перетині (перетин Π_4) профіль швидкостей становиться близьким до параболічного. Далі вниз по течії параболічний профіль зберігається, але значення швидкостей зменшуються і в деякому перетині набувають значень, близьких до нуля (перетин Π_5). Лінія розмежування течії (перетин Π_5) може набувати криволінійної форми або пульсувати.

В щілині регульованої опори формується течія рідини із прямими і зворотніми потоками. Прямі потоки B_1 , B_2 (рис. 6, б) виникають при витіканні робочої рідини із щілини опори. Керуючий струмінь формує зворотній потік B_0 . Лінія течії N розмежує прямі і зворотні потоки. Фактично зворотній потік B_0 закриває вихідний перетин частини щілини.

При відсутності струменевого керування опори (рис. 5, а) характеристики опори визначаються параметрами руху рідини в щілині та підвідних каналах. Перепад тиску по довжині щілини описується залежністю [10]:

$$p = \frac{12\mu L}{b\delta^3} Q + p_c, \quad (3)$$

де p – тиск в кармані; μ – динамічна в'язкість робочого середовища; L – середня довжина щілини; b – довжина периметра опорного елемента; δ – зазор між рухомими деталями опори; Q – загальна витрата робочого середовища; p_c – тиск на виході щілини. При відсутності керування $p_c=0$.

Характеристика течії рідини через дросель прийнята лінійною

$$p_H - p = RQ, \quad (4)$$

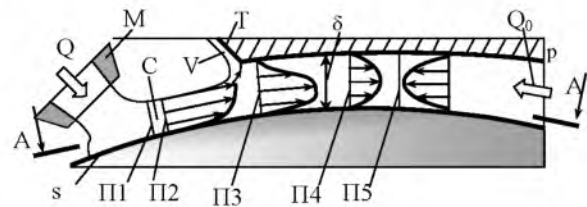
де p_H – тиск рідини на вході в дросель; R – гідравлічний опір дроселя.

Об'єднуючи (3) і (4), визначимо тиск в кармані опори:

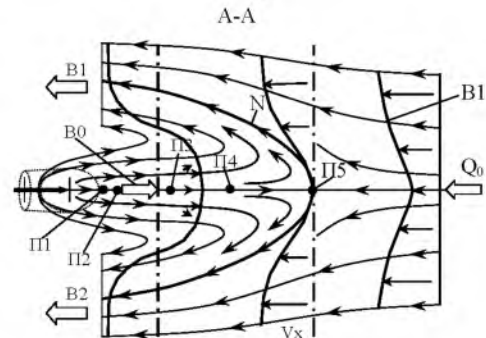
$$p = p_H / \left(1 + \frac{b\delta^3 R}{12\mu L} \right). \quad (5)$$

Рівняння рівноваги сил в гідростатичній опорі запишемо у вигляді:

$$F = p \cdot S_k + S_3 / 2 \cdot p, \quad (6)$$



а



б

Рис. 6 – Схема течії в щілині гідростатичної опори: а – схема течії в повздовжньому перетині щілини; б – схема течії в середині щілини

де S_k - площа кармана; S_s - площа поверхонь, які утворюють щілину.

Підставивши в формулу (6) значення тиску (5), одержимо силову характеристику гідростатичної опори без керування у вигляді:

$$F = p_H \left(S_k + \frac{1}{2} S_s \right) / \left(1 + \frac{b\delta^3 R}{12\mu L} \right). \quad (7)$$

Коли керуючий струмінь рідини проникає в щілину, в ній формується течія рідини із критичною точкою К (рис. 7). Положення критичної точки залежить від співвідношення тисків p і p_y . Введено припущення, що глибина проникнення струменя в щілину L_c є малою у порівнянні з довжиною (L) щілини.

Рівняння імпульсів для контрольного об'єму, обмеженого поверхнями σ_1 та σ_2 в проекціях на вісь струменя має вигляд [9]:

$$p_c \cdot \sigma_1 + \rho V_1^2 \sigma_1 = \sum_{i=1}^n (J_{yi} + J_{yi} \sin \alpha_i) + \rho V_2^2 \sigma_2 + 2\tau \cdot S_p, \quad (8)$$

де p_c - тиск в першому перетині; σ_1, σ_2 - площі першого та другого перетинів; ρ - густина середовища; V_1, V_2 - швидкості в перетинах; J_{yi} - імпульс i -го струменя; n - число струменів; α - кут зворотнього потоку; τ - дотичне напруження на стінках щілини; S_p - площа поверхонь щілини

Із рівняння нерозривності в першому наближенні випливає:

$$V_1 \sigma_1 \approx V_2 \sigma_2.$$

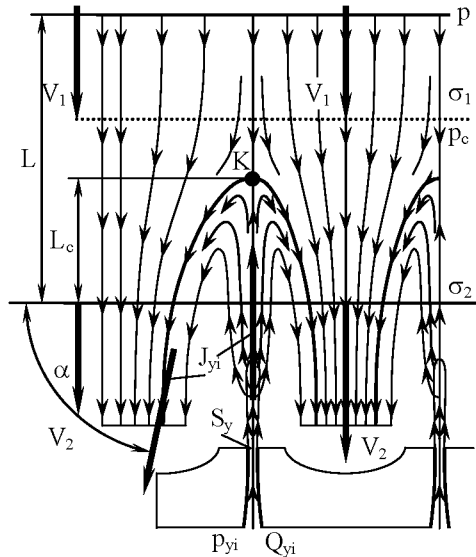


Рис. 7 – Схема течії рідини в щілині при струменевому регулюванні

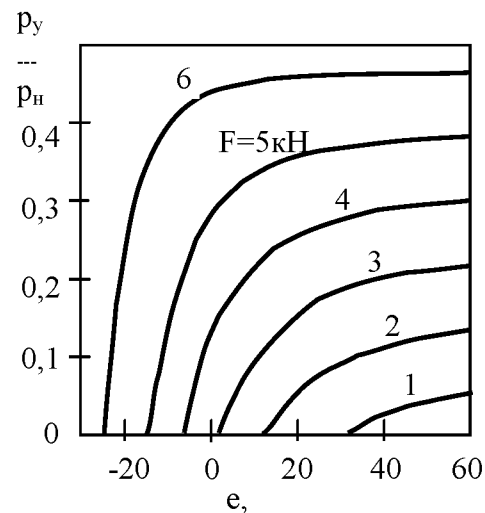


Рис. 8 – Регульовальна характеристика опори

Зворотня течія, що формується при розповсюдженні струменя в зустрічному потоці, як правило, має кут розповсюдження $\alpha \approx \pi/2$. Не враховуючи дії сил тертя, із рівняння імпульсів (8) одержимо

$$p_c = 2 \sum_{i=1}^n J_{yi} / \sigma_1.$$

Імпульс струменя визначиться через значення тиску на вході в сопло:

$$J_{yi} = \rho S_y V_{yi}^2 \cos \gamma = \rho \frac{Q_{yi}^2 \cos \gamma}{S_y} = \rho \frac{\mu_c^2}{S_y} \cdot \frac{2}{\rho} \cdot S_y^2 p_{yi} \cos \gamma = 2 \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma, \quad (9)$$

де μ_c - коефіцієнт витрати сопла; S_y - площа перетину сопла; p_{yi} - тиск на вході в сопло з номером i ; γ - кут між площиною опори і віссю сопла.

Враховуючи, що площа перетину щілини $\sigma_1 = b \cdot \delta$, із (8) і (9) держимо значення тиску у вихідному перерізі щілини у вигляді:

$$p_c = \frac{4 \sum_{i=1}^n \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma}{b \delta}. \quad (10)$$

Відповідно тиск в кармані гідростатичної опори визначиться із формули (3) при підстановці значення тиску p_c на виході щілини із формули (10). Остаточний тиск:

$$p = \frac{12 \mu L Q}{b \delta^3} + \frac{4 \sum_{i=1}^n \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma}{b \delta}. \quad (11)$$

Об'єднуючи дану залежність із характеристикою дроселя (4) та рівнянням рівноваги сил (8), знайдемо силову характеристику опори:

$$F = \left(S_k + \frac{1}{2} S_s \right) \left(p_H + 4 \sum_{i=1}^n \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma \cdot \frac{\delta^2 R}{12 \mu L} \right) / \left(1 + \frac{b \delta^3 R}{12 \mu L} \right). \quad (12)$$

Характеристика (12) є суттєво нелінійною (рис. 8). Рациональні значення тиску керування складають $p_y \approx 0.2 \dots 0.4 p_H$. Одержана характеристика є основою для визначення характеристик регульованого сферичного опорного вузла в цілому (рис. 9).

Всього гідростатичний сферичний опорний вузол має шість регульованих і одну нерегульовану (1П) гідростатичну опору. Три з регульованих опори 1В, 2В, 3В утворюють верхній несучий пояс, а три регульовані опори 1Н, 2Н і 3Н – нижній несучий пояс.

Для малих зміщень сфери зміна зазору в кожній точці сфери в радіальному напрямку залежить лише від одного параметра (кута θ_c) і визначається залежністю:

$$\delta = \delta_0 - |\vec{E}| \cdot \cos \theta_c, \quad (13)$$

де δ_0 - початковий зазор; \vec{E} - вектор переміщення сфери; θ_c - кут між віссю z і точками на сфері, де визначається зазор.

В проєкціях на осі координат x, y, z рівняння рівноваги

$$F_{3x} + \sum_{i=1}^N F_{ix} = 0, F_{3y} + \sum_{i=1}^N F_{iy} = 0, F_{3z} + \sum_{i=1}^N F_{iz} = 0. \quad (14)$$

де F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} - проєкції зусиль i -ї гідростатичної опори; $N=7$ - число опор.

Зусилля в кожній опорі відповідно формули (12) залежить від величини зазору, який в свою чергу визначається через вектор переміщень згідно формули (13). Відповідно зусилля в кожній гідростатичній опорі:

$$\vec{F}_i = \vec{F}_i(\delta_i), \quad \delta_i = \delta_i(e_x, e_y, e_z), \quad (15)$$

де e_x, e_y, e_z - проекції вектора переміщень \vec{E} .

Підставляючи в систему рівнянь (14) значення силових характеристик кожної опоривідповідних формулі (12) для зазору (13) визначимо зусилля \vec{F}_3 , яке відповідає вектору переміщення сфери \vec{E} (рис.10).

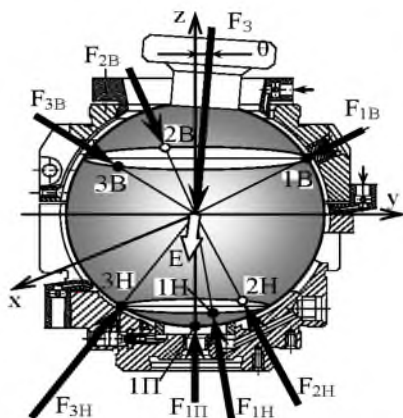


Рис. 9 – Схема дії реакції окремих гідростатичних опор у сферичному опорному вузлі

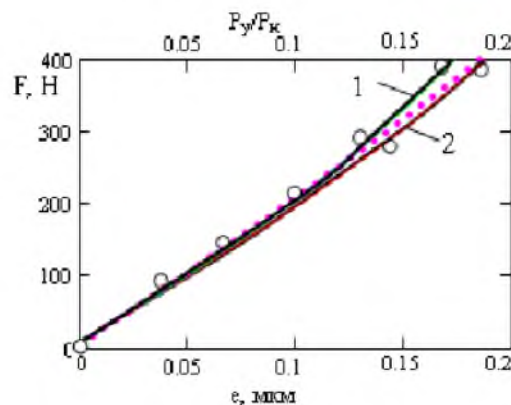


Рис. 10 – Залежність опорної реакції від переміщення сфери: крива 1 - $\theta=10^\circ$, крива 2 - $\theta=20^\circ$; точки експеримент

Висновки. Підтверджена можливість конструктивної реалізації регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла, який забезпечує сприйняття статичних зусиль до 5кН при стабільності положення сфери в межах 0,1...0,4 мкм та регулювання положення сфери в межах $\pm 0,1$ мкм.

Як напрямок подальших досліджень рекомендується дослідити динамічні характеристики регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла та розробити спеціальну мехатронну систему його керування.

Список літератури: 1. Рыбак, Л. А. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры [Текст] / Рыбак, Л. А., Ержуков, В. В., Чичварин, А. В. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 148 с. 2. Merlet, J. P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications [Text] / J. P. Merlet. – Berlin: Springer, 2006. – 394 p. 3. Крижанівський, В. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: навчальний посібник для ВНЗ [Текст] / Крижанівський, В. А., Кузнецов, Ю. М., Валявський, І. А., Склярів, Р. А. – Кіровоград, 2004. – 449 с. 4. Струтинський, В. Б. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: Монографія [Текст] / Струтинський, В. Б., Колот, О. В. – Краматорськ: ЗАТ “Тираж-51”, 2005. – 530 с. 5. Яхно, О. М. Система визначення точного положення регульованої гідростатичної сферичної опори [Текст] / Яхно, О. М., Струтинський, С. В. – К.: Вістник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія Машинобудування. – №52. – Київ, 2008. – С. 26-34. 6. Струтинський, С. В. Просторові системи приводів: монографія [Текст] / Струтинський, С. В., Гуржій, А. А. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с. 7. Патент України на корисну модель. МПК №31194 (2006) F16C32 / Гідростатично-аеростатичний опорний вузол [Текст] / Яхно, О. М., Струтинський, С. В. – №u200714415; заявл.20.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. №6. – 3 с. 8. Повх, И. Л. Техническая гидромеханика [Текст] / И. Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1969. – 524 с. 9. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973. – 847 с. 10. Башта, Т. М. Машиностроительная гидравлика [Текст] / Т. М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с. 11. Сигорский, В. П. Математический аппарат инженера [Текст] / В. П. Сигорский. – К.: Техніка, 1975. – 768 с.

Bibliography (transliterated): 1. Rybak, L. A., Erzhukov, V. V., Chichvarkin, A. V. (2011). Effective methods for solving problems of kinematics and dynamics of robot-machine parallel structure. Moscow : Fizmathlit, P. 148 c. ISBN978-5-9221-1296-3. 2. Merlet, J. P. (2006). Parallel Robots. Solid mechanics and applications., Berlin: Springer, 394. 3. Krizhanivskij, V. A., Kuznecov, Y. M., Valyavskij, I. A., Sklyarov, R. A. (2004). Technological equipment with parallel kinematics: textbook for universities. Edited by Kuznetsov, Y. M., Kirovograd, 449. 4. Strutynskiy, V. B., Kolot, O. V (2005). Mathematical modeling of stochastic processes in systems of drives. Monograph. Kramatorsk: "Tirazh -51", 530. 5. Jachno, O. M., Strutynskiy, S. V. (2008). The system for determining the exact position of the adjustable hydrostatic spherical bearing. Bulletin of National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", a series of Engineering, Kiev, 52, 26-34. 6. Strutynskiy, S. V. (2013). Spatial drive systems: Monograph. Strytynskij S.V. Gourzhiy A. A., Kiev: Pedagogical thought, 492. 7. Patent of Ukraine for useful model (2006). MPK No 31194 F16C32. Tostation-aerostation anchor node. Jachno, O. M., Strutynskiy, S. V. No. u200714415; Appl.20.12.2007; publ. 25.03.2008, 6, 3. 8. Povkh, I. L. (1969). Technical hydromechanics. Lviv: Engineering, 524. 9. Loitsyansky, L. (1973). Mechanics of liquid and gas. Moscow: Nauka, 847. 10. Basta, T. M. (1971). Engineering hydraulics. Moscow: Mashinostroenie, 672. 11. Sigorskij, B. N. (1975). Mathematical apparatus engineer. Kiev: Machinery, 768.

Надійшла (received) 17.12.2014

УДК 666.1.031

В. С. ЦАПАР, ст. викл., НТУУ «КПІ» Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРІОДІВ ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ ПАЛЬНИКІВ НА ОДНОРІДНІСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Проведено дослідження залежності температурного розподілу у скловарній регенеративній печі від величини періодів роботи пальників, визначено вплив періодів переключення пальників на однорідність температурного поля у печі. Отримано значення температур у контрольних точках скловарної печі при періодах переключення пальників 20, 30 та 45 хвилин. Визначено необхідність формування критерію оптимальності переключення пальників, котрий визначатиме час переключення в залежності від значень поточних параметрів у печі та навколишнього впливу.

Ключові слова: період переключення пальників, скловарна піч, скляна тара, температурні поля.

Вступ. Велика увага на сучасному етапі розвитку промислових технологій приділяється якості готової продукції. Оптимізація витрат, вдосконалення технологій ставить все вищі і вищі вимоги до якості виробів. Зокрема, дуже чутливі до якості склотари сучасні автоматичні лінії пакування та розливу.

Значну питому вагу в товарообігу пакувальної продукції займає скляна тара. Скляною тарою називають групу скляного посуду, яка призначена для фасування, транспортування, зберігання і використання при споживанні різних продуктів. Скляна тара є незамінною для упакування багатьох харчових продуктів і напоїв.

Скло, в якості пакувальної продукції, має свої переваги:

- хімічна нейтральність забезпечує збереження харчових продуктів без суттєвих змін;
- прозорість;
- міцність та стійкість до навантажень;
- стійкість до внутрішнього тиску дає змогу випускати газовані напої та аерозольні товари;

© В. С. ЦАПАР, 2014

– стійкість до нагрівання.

Скло витримує температуру до 500°C, хоча різка зміна температури не повинна бути надвеликою та швидкою. Значна кількість товарів фасується в нагрітому стані або після фасування проводиться їх стерилізація.

Серед недоліків скла можна виділити крихкість та велику питому вагу. Значно підвищують крихкість скла дефекти, які виникають у ньому під час виробництва. Ці дефекти напряму залежать від температурного режиму скловарної печі [1], а саме від однорідності температурного розподілу по всьому об'ємі скломаси.

На даному етапі дослідники значну частину своїх робіт присвячують ефективності роботи регенераторів. Так, у роботах [2, 3] розглянуто підхід до визначення величини циклу роботи пальників з точки зору ефективної роботи регенераторів. У роботі [4] пропонується методика розрахунку оптимальної величини циклу роботи пальників для досягнення максимальної теплової потужності регенератора. У роботах [5–6] описано розробку систем керування переключеннями пальників, метою котрих є отримання максимального ефекту від використання регенераторів.

Проте окрім енерго– та ресурсозбереження, важливим є також забезпечення високої якості готової продукції. Сучасні пакувальні лінії дуже чутливі до якості скляної тари, котра в свою чергу залежить від однорідності температурних полів скловарної печі [6], саме тому актуальним напрямком дослідження є визначення залежності температурного розподілу у ванній регенеративній скловарній печі з підковоподібним напрямком полум'я від періоду роботи пальників.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження залежності температурного розподілу у скловарній регенеративній печі від величини періодів роботи пальників.

Методика дослідження залежності температури від величини періодів роботи пальників. Дослідження проводилось шляхом імітаційного моделювання роботи ванної регенеративної скловарної печі із підковоподібним напрямком полум'я. Отримано значення температур у точках печі в котрих зазвичай розташовуються засоби вимірювання температури. В даному випадку взяті точки в котрих розташовані термометри на скловарній печі Гостомельського скловарного заводу ВАТ Ветропак. Ці точки Дно1 (2,0.2,1), Дно2 (7,0.2, 1), Склепіння1 (2, 2.4, 7), Склепіння2 (7,2.4,7) і Середина (4.5, 1.3, 5), у дужках наведено Декартові координати відповідних точок, за умови, що початком координат вибрано нижній правий передній кут печі. Розглянуто режими роботи печі із періодами переключення пальників 20, 30 та 45 хвилин. Для кожного режиму проведено дослідження трьох циклів роботи пальників.

Аналіз роботи скловарної печі із періодами переключення пальників 20, 30 та 45 хвилин. На першому етапі досліджено режим роботи скловарної печі із періодом переключення пальників 20 хвилин. На рис. 1 наведено графік зміни температур у вказаних точках у часі під час роботи скловарної печі із періодом переключення пальників 20 хвилин.

На рис. 2 наведено графік зміни температур у вказаних точках у часі під час роботи скловарної печі із періодом переключення пальників 30 хвилин.

На рис. 3 наведено графік зміни температур у вказаних точках у часі під час

роботи скловарної печі із періодом переключення пальників 45 хвилин.

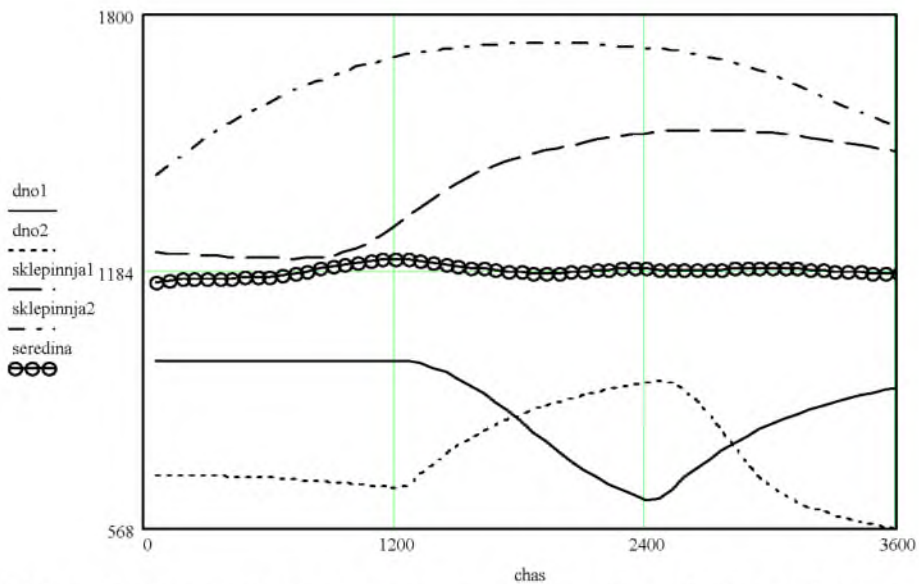


Рис. 1 – графік зміни температур у точках Дно 1, Дно 2, Склепіння 1, Склепіння 2 і Середина під час роботи скловарної печі із періодом переключення пальників 20 хвилин

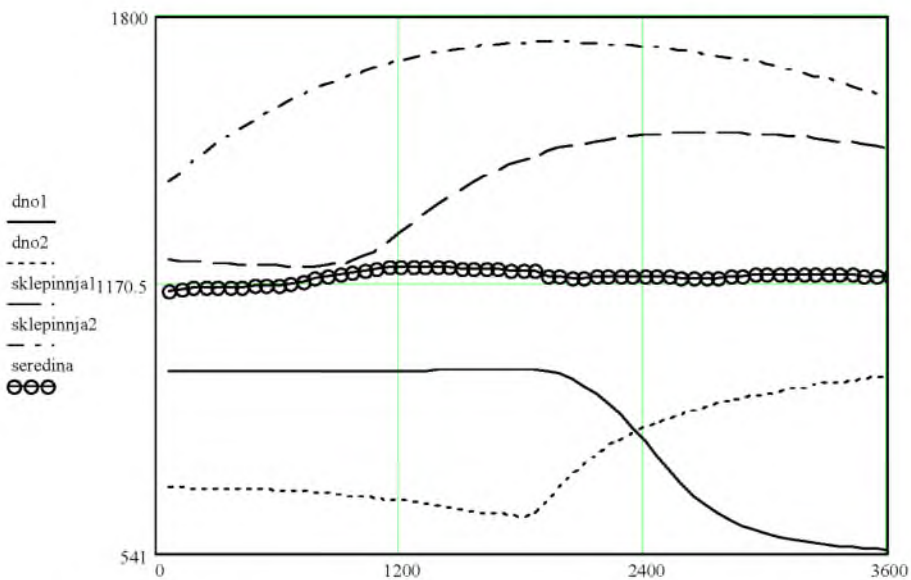


Рис. 2 – графік зміни температур у точках Дно 1, Дно 2, Склепіння 1, Склепіння 2 і Середина під час роботи скловарної печі із періодом переключення пальників 30 хвилин

У табл. 1 наведено діапазон змін температур у кожній точці в залежності від періоду переключення пальників у печі.

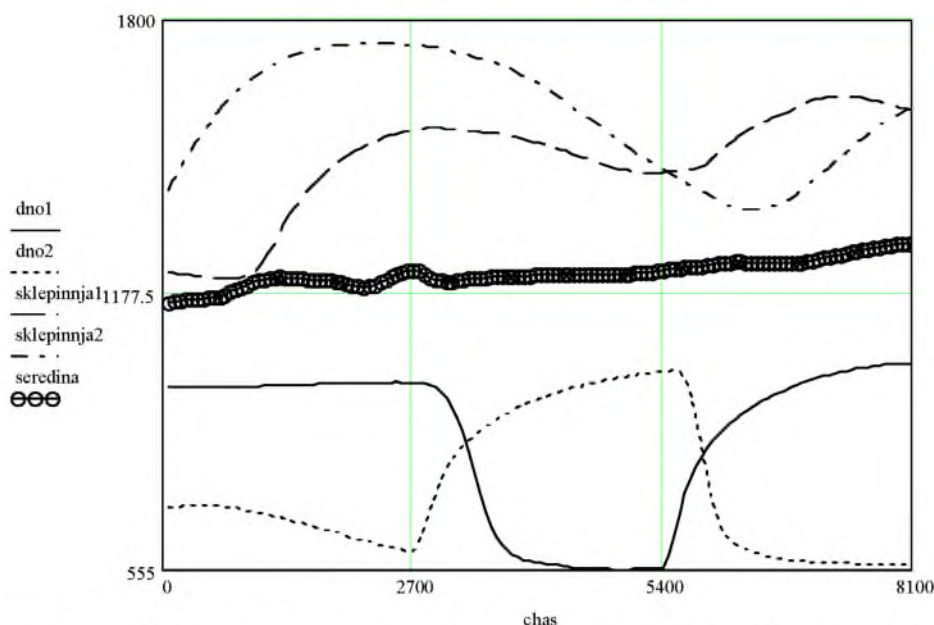


Рис. 3 – графік зміни температур у точках Дно 1, Дно 2, Склепіння 1, Склепіння 2 і Середина під час роботи скловарної печі із періодом переключення пальників 45 хвилин

Таблиця 1 – Діапазон зміни температур у точках Дно 1, Дно 2, Склепіння 1, Склепіння 2 і Середина за різних періодів переключення пальників

Період переключення	Діапазон зміни температури (градуси, К) при відповідному періоді переключення у точці:				
	Дно1	Дно2	Склепіння1	Склепіння2	Середина
20 хвилин	333	353	308	315	55
30 хвилин	423	418	315	326	59
45 хвилин	466	440	413	373	70

Як можна бачити із рисунків та даних наведених у табл. 1, існує значна залежність між температурами у відповідних точках та часом роботи лівих і правих пальників. У точках Дно1 та Дно2 спостерігаються значні коливання температури, аж до 460 градусів. Ці коливання пояснюються тим, що разом із переключенням пальників, переключається і сторона загрузки шихти. Наприклад, при включених правих пальниках загрузка відбувається із правої сторони і навпаки. При переключенні пальників, холодна шихта, котра подається в піч, буде витіснати уже нагріту, що саме і призводить до таких значних коливань. У точках Склепіння1 та Склепіння2 коливання вимірюваних температур також залишаються значними і досягають 413 градусів. Пояснюється це тим, що переключення пальників призводить до зміни потоків газового середовища печі. Якщо, наприклад, спочатку горіння відбувається в лівій частині, то після переключення пальників, воно буде відбуватись в правій. Все це призводить до того, що виникають вищенаведені неоднорідності. У точці Середина коливання температур значно менші, в межах 70 градусів. Це пояснюється розташуванням точки Середина, адже в даній точці зміна роботи пальників не призводить до значних коливань, оскільки вона знаходиться поза зоною значного впливу горіння.

Для дослідження температурної однорідності скломаси було отримано експоненціальне усереднення температури у точках Дно2 та Середина. Відповідні графіки наведені на рис. 4–9.

На рис. 4–5 наведено експоненціальне усереднення температури у точках Дно2 та Середина на протязі роботи пальників із циклом переключення 20 хвилин.

На рис. 6–7 наведено експоненціальне усереднення температури у точках Дно2 та Середина на протязі роботи пальників із циклом переключення 30 хвилин.

На рис. 8–9 наведено експоненціальне усереднення температури у точках Дно2 та Середина на протязі роботи пальників із циклом переключення 45 хвилин.

Як можна бачити із наведених рисунків, задача визначення оптимального періоду переключення пальників достатньо неоднозначна. Це також підтверджують роботи [7, 8]. Характер зміни усереднених значень температури при досліджених режимах переключення фактично однаковий, у точці Дно2 середня температура залишається практично сталою, у точці Середина – незначно зростає з часом.

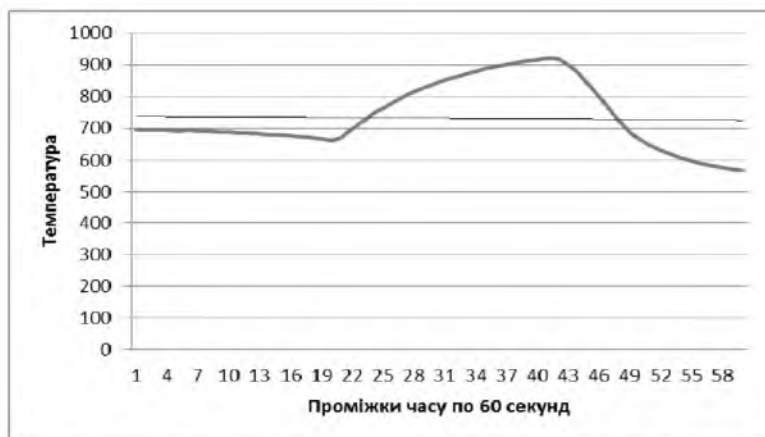


Рис. 4 – експоненціальне усереднення температури у точці Дно 2 на протязі роботи пальників із циклом переключення 20 хвилин

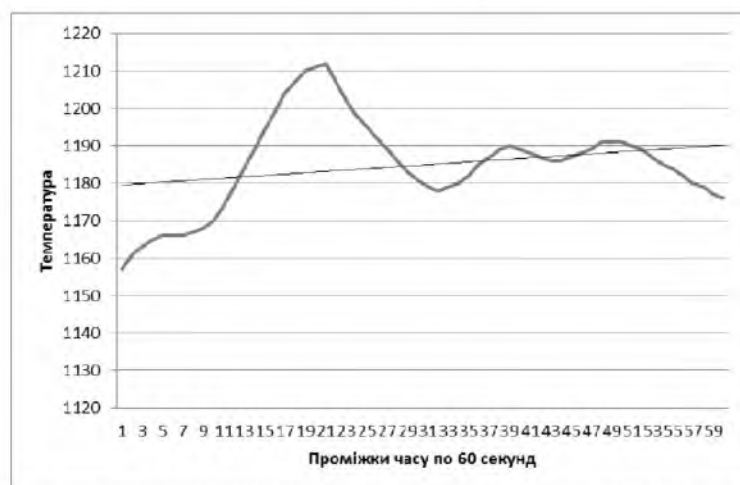


Рис. 5 – експоненціальне усереднення температури у точці Середина на протязі роботи пальників із циклом переключення 20 хвилин

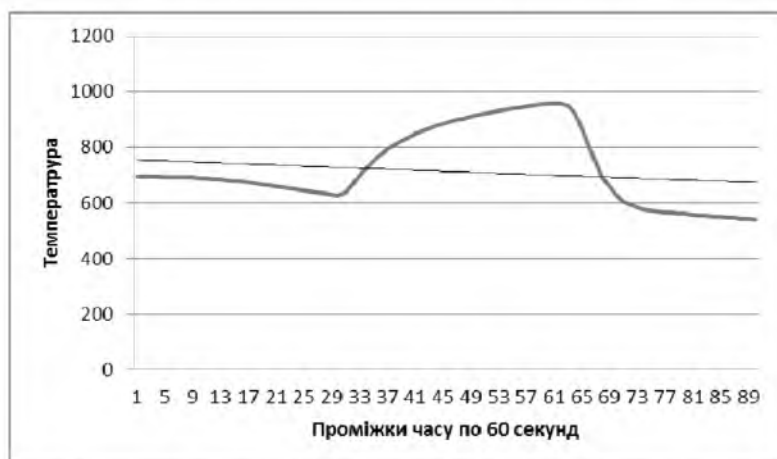


Рис. 6 – експоненціальне усереднення температури у точці Дно 2 на протязі роботи пальників із циклом переключення 30 хвилин

Проте, відрізняється значення середньої температури, при режимі переключення пальників тривалістю 20 хвилин вона найнижча, при 45 хвилинах – найвища. Можна зробити висновок, що збільшення періоду переключення пальників призводить до збільшення середньої температури у відповідних точках. Проте, з іншого боку, збільшення періодів переключення пальників призводить до зниження ефективності використання регенераторів [9].

Оскільки визначення оптимального часу переключення пальників є багатофакторною задачею [10], котра повинна враховувати, як вимоги до температурної однорідності скломаси, так і вимоги до ефективного використання регенераторів, перспективним напрямком подальших досліджень є формування певного критерію оптимальності переключення пальників, котрий визначатиме час переключення в залежності від значень поточних параметрів у печі та навколишнього впливу.

Висновки. Проведено дослідження впливу періодів переключення пальників на однорідність температурного поля скловарної печі. Отримано графіки зміни температури в характерних точках печі при роботі із періодами переключення пальників 20, 30 та 45 хвилин. Визначено необхідність формування критерію оптимальності переключення пальників, котрий визначатиме час переключення в залежності від значень поточних параметрів у печі та навколишнього впливу.



Рис. 7 – експоненціальне усереднення температури у точці Середина на протязі роботи пальників із циклом переключення 30 хвилин

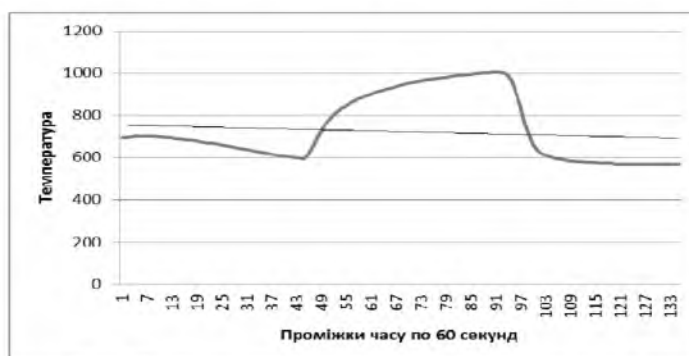


Рис. 8 – експоненціальне усереднення температури у точці Дно 2 на протязі роботи пальників із циклом переключення 45 хвилин



Рис. 9 – експоненціальне усереднення температури у точці Середина на протязі роботи пальників із циклом переключення 45 хвилин

Список літератури: 1. *Синявський, Ю. В.* Совершенствование энергосберегающих систем в промышленном производстве стекломассы [Текст] / : дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Синявський. – 2001. – 159 с. 2. *Кошельник, А. В.* Расчет оптимального времени цикла работы регенераторов плавильных печей [Текст] / А. В. Кошельник, Е. В. Хавин, Е. П. Гордиенко // Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2009. – № 22. – С. 121–126. 3. *Глуцник, Н. В.* Підвищення ефективності роботи регенераторів скловарних печей [Текст] / Н. В. Глуцник, І. Л. Шилович, А. Я. Карвацький, Г. М. Васильченко, І. В. Пулінець // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2009. – № 1. 4. *Елин, Н. Н.* Экспериментальная проверка математической модели регенератора с неподвижной кирпичной насадкой [Текст] / Н. Н. Елин, М. Ю. Ометова, Г. В. Рыбкина // Вестник «ИГЭУ». – 2011. – № 1. – с. 1–3. 5. *Yang, Q. Y.* Study of Burny-Changing Disturbance Suppression Based on Fuzzy Control for Large Glass Furnace [Text] / Q. Y. Yang, R. Shi // Control and Instruments in Chemical Industry. – 2001. – № 28(02). – P. 13–17. 6. *Guo, Y. C.* Numerical Simulation of Gas Combustion and Heat Transfer in a Glass Melting Furnace [Text] / Y. C. Guo, W. Q. Lin // Journal of Combustion Science and Technology. – 2000. – № 6(03). – P. 244–248. 7. *Жученко, А. І.* Study of the glass furnace temperature field effect on glass product quality factors [Текст] / А. І. Жученко, В. С. Цапар // Вісник НТУУ «КПІ» Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2014. – № 1(12). – С. 7–11. 8. *Jian-ping, O.* Dynamic simulation on effect of flame arrangement on thermal process of regenerative reheating furnace [Text] / O. Jian-ping, M. Ai-chun, Z. Shu-hua, Z. Jie-min, X. Ze-qiang // J. Cent. South Univ. Technol. – 2007. – № 02. – P. 243–247. 9. *Danon, B.* Parametric optimization study of a multi-burner flameless combustion furnace [Text] / B. Danon, E. Cho, W. De Jong, D. Roekaerts // Applied Thermal Engineering, Elsevier. – 2011. – № 31. – P. 1–17. 10. *Алексеевко, В. В.* Дослідження та розробка систем опалення промислових печей на основі регенеративних пальникових пристроїв [Текст] : автореф. дис. ... кандидата техн. наук : 05.14.06 / В. В. Алексеевко ; [Ин-т газу НАНУ] . – К., 2004. – 19 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Syniavskiy, Yu. V.* (2001). Improving the energy-efficient systems in the industrial production of glass. (dis. Ph.D.). 2. *Koshelnyk, A. V., Khavyn E. V., Hordyenko E. P.*(2009). The calculation of the optimum cycle time regenerators smelters. Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya, 22, 121–126. 3. *Hlushchyyk, N. V., Shylovykh I. L., Karvatskyi A. Ia., Vasylchenko H. M., Pulinets I. V.* (2009). Improving the efficiency of regenerators glass furnaces. Chemical engineering, ecology and resource, 1. 4. *Elyn, N. N., Ometova M. Yu., Rybkyna H. V.* (2011). Experimental verification of the mathematical model of the regenerator with a fixed nozzle brick. Herald "ISPU", 1, 1–3. 5. *Yang, Q. Y., Shi, R.* (2001). Study of Burny-Changing Disturbance Suppression Based on Fuzzy Control for Large Glass Furnace. Control and Instruments in Chemical Industry, 28(02), 13–17. 6. *Guo, Y. C., Lin, W. Q.* (2000). Numerical Simulation of Gas Combustion and Heat Transfer in a Glass Melting Furnace. Journal of Combustion Science and Technology, 6(03), 244–248. 7. *Zhuchenko, A. I., Tsapar V. S.* (2014). Study of the glass furnace temperature field effect on glass product quality factors. Journal of NTU "KPI" Chemical engineering, ecology and resource, 1(12), 7–11. 8. *Jian-ping, O., Ai-chun, M., Shu-hua, Z., Jie-min, Z., Ze-qiang X.* (2007). Dynamic simulation on effect of flame arrangement on thermal process of regenerative reheating furnace . J. Cent. South Univ. Technol, 02, 243–247. 9. *Danon, B., Cho, E., De Jong, W., Roekaerts, D.* (2011). Parametric optimization study of a multi-burner flameless combustion furnace. Applied Thermal Engineering, 31, 1–17. 10. *Alekseienko, V. V.* (2004). Research and development of industrial heating furnaces based regenerative burners. (Abstract. Thesis. Candidate of Engineering. of Science).

Надійшла (received) 17.12.2014

Э. М. КУЛИНИЧ, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОБЕТОНА

Предложено повышение эффективности технологической линии приготовления газобетона путем решения задачи оптимального распределения ресурсов с целевой функцией в виде позинома. Обосновано решение этой задачи методами геометрического программирования. Оптимальное управление синтезируется как распределение ресурса энергии по ее технологическим аппаратам.

Ключевые слова: оптимальное управление, технологическая линия, геометрическое программирование, позином, газобетон, материальные потоки.

Введение. Повышение эффективности процесса управления технологическими линиями производства газобетона является актуальной научно-практической задачей ввиду перспективности газобетонных изделий [1 – 3]. Решение этой задачи достигается за счет применения методов оптимального и адаптивного управления, как отдельными технологическими аппаратами, так и подсистемами технологической линии [4 – 7]. Использование этих методов для управления динамическими компонентами линии позволяет снизить затраты на управление и простои из-за ошибок регулирования, однако, наибольший эффект дает оптимальное распределение ресурсов и потоков технологической линии в целом путем решения задачи оптимизации материальных потоков [8]. Поскольку алгоритмы решения этой задачи [9, 10] опираются на методы линейного программирования или метод динамического программирования, что приводит к сложным алгоритмам управления и снижает эффективность управления.

Цель работы. Целью работы является обоснование применения оптимального управления распределением материальных потоков по оборудованию технологической линии (ТЛ) приготовления газобетона (ПГ) на основе использования позиномиального функционала цели и метода геометрического программирования для повышения эффективности ТЛ.

Методика исследования. В основу исследований положены: методы декомпозиции сложных систем при построении структуры технологической цепочки и определения основных материальных потоков и ресурсов ТЛ ПГ; методы геометрического программирования для решения задач оптимальной загрузки ТЛ ПГ и оптимального распределения материальных потоков по технологическим аппаратам.

Обсуждение результатов исследования. На основании анализа технологического процесса и определения основных материальных потоков и ресурсов линии ПГ была определена структура технологической цепочки, укрупненная схема которой приведена на рис. 1. Основываясь на данной структуре, рассмотрим задачу распределения ресурсов в технологической цепочке.

Входной поток материала поступает в дозаторы с коэффициентом передачи K_1, K_2, K_3, K_8 , после дозирования материал поступает в смеситель K_4 и после сушки (вызревания массива) K_5 и порезки K_6 поступает в автоклав K_7 для термовлажностной обработки. В структуре цепочки предусмотрен рецикл отходов с коэффициентами передачи по контурам α, β, γ через дозатор-смеситель K_8 .

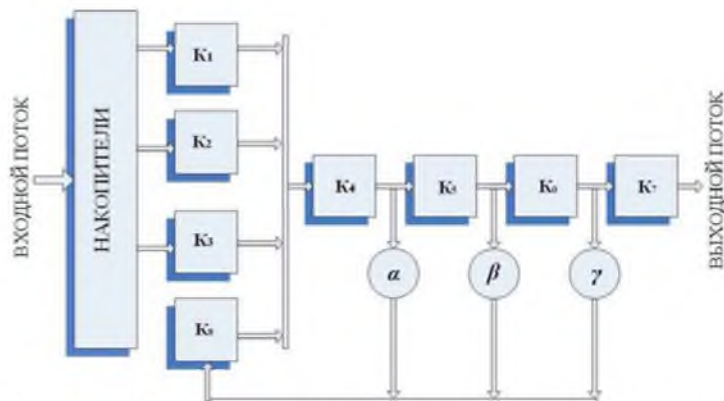


Рис. 1 – Структура технологической цепочки приготовления газобетона

с коэффициентами передачи по контурам α, β, γ через дозатор-смеситель K_8 .

Коэффициент передачи определить как массу готового к передаче на следующий аппарат цепочки материала $\rho_i V_i(t)$ отнесенную к T_i - длительности стадии процесса на данном аппарате и номинальной входной массе отнесенной к номинальному времени загрузки аппарата m_i^*/T_i^* .

$$K_i = \frac{\rho_i V_i(t) T_i^*}{T_i m_i^*} \quad (1)$$

При этом $x_i(t)$ определяет состояние аппарата, как объекта управления в технологической цепочке и определяется именно количеством (объемом) передаваемого материала. Таким образом, формируем вектор $\mathbf{x}(t)$ – вектор состояния систем. Эффективность использования аппарата $f_i(x_i(t))$ оценивается отношением:

$$f_i(x_i(t)) = K_i = \frac{x_i(t) q_i^*}{T_i q_i}, \quad (2)$$

где q_i и q_i^* - удельная и выдаваемая мощности.

Принятая форма функции цели позволяет просто оценить эффективность работы всей линии. Так как в основе частных функций цели положен коэффициент передачи материального потока и учитывая структуру частных функций цели, а также приняв

$$C_j = \prod_{i=1}^6 \frac{\rho_i T_i^* q_i^*}{T_i m_i^* q_i}, \quad (3)$$

запишем функцию цели для технологической цепочки в виде:

$$f(\mathbf{x}(t)) = \sum_{i=1}^6 C_j \prod_{j=1}^8 x_i^{a_{ij}}(t). \quad (4)$$

Таким образом, функция цели для технологической цепочки ПГ представляет собой позином. Задача оптимизации в этом случае ставится как задача геометрического программирования, которая при неотрицательных компонентах вектора \mathbf{x} и ограничениях в виде позиномов имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* &= \arg \min f(\mathbf{x}); \\ x_i &> 0, \quad i = \overline{1, m}; \quad g_k(\mathbf{x}) \leq 1, \quad k = \overline{1, p}. \end{aligned} \quad (5)$$

Вводя ограничения как естественное требование отсутствия переполнения рабочего объема аппарата:

$$g_k(\mathbf{x}) = \frac{v_k}{v_k^{\max}} \leq 1, \quad k = \overline{1, m} \quad (6)$$

и учитывая, что для задачи поиска максимума в геометрическом программировании меняется вид функции цели:

$$\mathbf{x}^* = \arg \min f(\mathbf{x}) = \arg \min \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \prod_{j=1}^m x_j^{-a_{ij}}. \quad (7)$$

Введем обозначения

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n u_i; \quad \delta_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_i}. \quad (8)$$

Запишем двойственную функцию в задаче с ограничениями

$$w(\delta) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{\delta_i} \right)^{\delta_i} \prod_{k=1}^m \lambda_k^{\lambda_k}, \quad (9)$$

где λ_i определяется суммой двойственных переменных ограничений

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^m \delta_k^o. \quad (10)$$

В двойственной задаче условие нормирования и ортогональности выступают в роли ограничений.

Используя условие нормирования

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = 1, \quad (11)$$

и условия ортогональности задаче с ограничениями

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} \delta_i + \sum_{k=1}^m a_{kj}^o \delta_k^o = 0, \quad j = \overline{1, p}, \quad (12)$$

можно найти оптимальное значение двойственных переменных, а также записать систему уравнений, позволяющую определить веса частных целевых функций в функции цели. Оптимально веса распределяются согласно структуре технологической цепочки, однако реальное распределение весов зависит от времени и загрузки аппаратов, в этом случае контролируя степень выполнения ограничений можно определить реальные веса

$$\delta_i^*(t) = \frac{\delta_i^o(t)}{\sum_{k=1}^m \delta_k^o(t)}. \quad (13)$$

Используя свойства геометрического программирования, находим значение функции цели в оптимуме в момент времени t

$$f^*(t) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{\delta_i^*(t)} \right)^{\delta_i^*} \prod_{k=1}^m \left(\sum_{k=1}^m \delta_k^o \right)^{\sum_{k=1}^m \delta_k^o}, \quad (14)$$

что открывает возможность реализации управления путем распределения затрат энергии для достижения оптимального распределения весов функции цели. Таким образом, при управлении единичной ТЛ целесообразно решение задачи оптимального распределения по аппаратам цепочки затрат энергии. Так обозначив

$$C_j = \prod_{i=1}^6 \frac{\rho_i T_i^* q_i^*}{T_i m_i^* q_i} = \prod_{i=1}^6 q_i^* \prod_{i=1}^6 \frac{\rho_i T_i^*}{T_i m_i^* q_i} = q_j C_j^* \quad (15)$$

и найдя оптимальное распределение весов δ_i^* из ранее рассмотренной задачи (6) можно найти оптимальное распределение энергии по контурам технологической цепи

$$q_i^* \arg \min f^*(t) = \arg \max \prod_{i=1}^n \left(\frac{q_i C_i^*}{\delta_i^*(t)} \right)^{\delta_i^*} \prod_{k=1}^m \left(\sum_{k=1}^m \delta_k^o \right)^{\sum_{k=1}^m \delta_k^o} \cdot \quad (16)$$

$$q_i^* \leq q_i^{\max}$$

Решение данной задачи сводится к выравниванию материальных потоков за счет изменения подачи энергии. Существенной особенностью данного подхода является простота определения значения функции цели.

Рассматривая вектор ограничений, как измеряемый и учитывая, что особенностью является вырожденность данного позинома, так как показатель степени a_{ij} принимает значение ноль или единица, рассмотрим задачу оптимального управления. Однако данная функция цели позволяет оценить эффективность процесса и корректно поставить задачу выбора траектории доставляющей максимум функционала выхода продукта

$$\mathbf{x}^*(t) \rightarrow \arg \max \int_{t_0}^{t_1} f(\mathbf{x}(t)) dt; \quad (17)$$

$$\mathbf{x}^*(t) \in X_{\text{oon}}(t); \quad X_{\text{oon}}(t_0) = X_0, \quad X_{\text{oon}}(t_1) = X_1.$$

Ограничения, связанные с динамикой технологических аппаратов, в данном случае не существенны, так как качество их режимов обеспечено локальным управлением аппаратов, в отличие от оптимальности всей линии.

Задача (17) это вырожденная простая вариационная задача, так как функция цели не зависит от производной вектора состояния. Уравнение Эйлера принимает вид

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{x}}} \right) = 0 \rightarrow \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} = 0. \quad (18)$$

Из этого следует простое утверждение, что функция цели должна быть максимальна в каждой точке траектории.

Существенной особенностью данной задачи является возможность использования метода геометрического программирования для обеспечения условия оптимальности. Предположим, что в простой задаче Лагранжа

$$(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, t^*) \rightarrow \inf J(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \int_{t_0}^{t_1} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt;$$

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \quad \dim \mathbf{x} = \dim \mathbf{f} = n; \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x}(t_1) = \mathbf{x}_1,$$

интегрант функционала цели является позиномом (4) и на траектории выполняется условие неотрицательности.

Из стандартного для принципа максимума предположения, что целевой функционал обладает выпуклыми свойствами (квазирегулярен или регулярен - строго выпукл), что позволяет считать ограничения выпуклыми, получаем задачу выпуклого программирования.

Достоинство такой постановки задачи в том, что в случае справедливости предположения выпуклости задачи мы при решении задачи имеем единственный глобальный минимум. Условия выпуклости позволяют использовать теорему Куна-Таккера для Лагранжиана:

$$L(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}, \lambda^*) \leq L(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) \leq L(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, \lambda^*).$$

Введя связь $\lambda_i = \lambda_i(\mathbf{u})$, $i = \overline{1, n}$, запишем $H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}) \leq H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) \leq H(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*)$

Функция Гамильтона в данной задаче имеет вид:

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \lambda) = \lambda_0 \sum_{i=1}^n C_i \prod_{j=1}^m x_j^{a_{ij}}(t) + \langle \lambda^T, \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \rangle. \quad (19)$$

Учитывая идентичность экстремальных свойств функции Лагранжа и функции Гамильтона, запишем условие Куна-Таккера в терминах функции Гамильтона $H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}) \leq H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) \leq H(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*)$. Отсюда формируем прямую и двойственную задачу с разделением переменных состояния и управления:

$$\mathbf{x}^* =_{u=\mathbf{u}^*} \arg \min H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*)$$

$$\mathbf{u}^* =_{x=\mathbf{x}^*} \arg \max H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*)$$

Предполагая, что траектория движения оптимальна $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$, переходим к двойственной задаче: $\mathbf{u}^* =_{x=\mathbf{x}^*} \arg \max H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*)$. При этом выполняются необходимые условия оптимума в канонической форме:

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{d\lambda}{dt}; \quad \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \frac{d\mathbf{x}}{dt} \text{ и условие стационарности по управлению: } \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0}.$$

Так как задача стационарна $\mathbf{u}^* =_{x=\mathbf{x}^*} \arg \max H(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \lambda^*) = \mathbf{0}$.

Собственно, это и есть принцип максимума Понтрягина - на оптимальной траектории при оптимальном управлении функция Гамильтона достигает своего максимума. В таком случае для выпуклого неотрицательного интегранта в каждой точке траектории

$$\mathbf{x}^*(t) = \arg \min \sum_{i=1}^n C_i \prod_{j=1}^m x_j^{a_{ij}}(t) = f_0^*; \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n C_i \prod_{j=1}^m x_j^{a_{ij}}(t) > 0; \quad t \in (t_0, t_1).$$

Что позволяет записать

$$\langle \lambda^T, \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \rangle = -f_0^*; \quad \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0}; \quad \frac{\partial H}{\partial \lambda} = \mathbf{0}. \quad (21)$$

При этом в виду выпуклости задачи выполняется условие неположительности множителей Лагранжа ($\lambda_i \leq 0$). Следовательно, для одномерной задачи, к которой приводится задача оптимального управления линией ПГ, на каждой точке траектории $\mathbf{x}^*(t)$ выполняется условие

$$u^* =_{x=\mathbf{x}^*} \arg \max f(x, u) = f_0^*. \quad (22)$$

Данное условие является частным случаем принципа максимума Понтрягина, подобным условиям оптимальности в задаче о максимальном быстродействии линейной системы. В данном случае принцип максимума не только необходимое условие, но и является достаточным условием благодаря выпуклости интегранта функционала цели задачи.

Выводы. Задача управления ТЛ ПГ является задачей распределения ресурсов с целевой функцией в виде позинома и решается методами геометрического программирования. При этом оптимальное управление синтезируется как распределение ресурса энергии по технологическим аппаратам ТЛ. При использовании позиномиального интегранта, в задаче оптимального управления приготовлением газобетона, возможно использование метода Понтрягина, при этом максимум функции Гамильтона определяется с учетом максимального значения интегранта, которое легко находится методом геометрического программирования.

Список литературы: 1. Сажнев, Н. П. Производство ячеистобетонных изделий. Теория и практика [Текст] / Н. П. Сажнев, В. Н. Гончарик, Г. С. Гарнашевич и др. – Минск: НПООО «Стринко», 2004. – С. 4-7. 2. Большаков, В. И. Производство автоклавного газобетона в Украине [Текст] / В. И. Большаков, В. А. Мартыненко, В. В. Ястребцов // Строительные материалы и изделия. – 2006. – № 4. – С. 8-12. 3. Постановка Кабинету Міністрів України від 26 травня 2004р. № 684 “Програма розвитку виробництва ніздрюватобетонних виробів та їх використання у будівництві на 2005-2011 роки” // Строительные материалы и изделия. – 2004. – № 4. – С. 34–37. 4. Зиновкин, В. В. Автоматизированное управление электроприводом двухкомпонентного дозирования многопараметрической технологической линии приготовления газобетона [Текст] / В. В. Зиновкин, Э. М. Кулинич // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010, – № 28. – С. 412–413. 5. Кулинич, Э. М. Оптимальное управление многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона [Текст] / Э. М. Кулинич, В. О. Мирный, Ю. Н. Умеров // «Компьютерные технологии и информационные системы в электротехнике»: Всероссийский конкурс научных работ студентов, магистрантов и аспирантов (Тольятти, 29 ноября 2011 года): сборник материалов – Тольятти: ТГУ, 2011. – С. 29-37. 6. Кулинич Э. М. Моделирование автоматизированного управления многокомпонентным дозированием технологического процесса приготовления газобетона [Текст] / Э. М. Кулинич, В. В. Зиновкин, Ю. А. Крисан, С. И. Арсеньева // Вісник національного технічного університету "ХПІ". - Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 57/2010, – С. 271–277. 7. Зиновкин, В.В. Моделирование процесса утилизации отходов в технологии производства газобетона [Текст] / В.В. Зиновкин, Э.М. Кулинич // Стратегія якості у промисловості і освіті : міжнар. конф., 6–13 червня 2009р. : тези докл. – Варна, Болгарія, 2009. – Т. 2. – С. 176 – 179. 8. Дудников, Е. Г. Автоматическое управление в химической промышленности. [Текст] / Под ред. Е. Г. Дудникова, М.: «Химия» -1987.-368 с. 9. Карпущина, Н. В. Методы искусственного интеллекта в задачах оперативного управления и оптимизации сложных технологических комплексов [Текст] / Н.В. Карпущина, К. М.Пастухова, П. А. Свиридов // Проблемы управления. 2003 №3. – С. 21-24. 10. Даффин Р. Геометрическое программирование [Текст] / Р. Даффин, Э. Патерсон, К. Зенер. М.: «Мир». -1972. -312 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sazhnev, N. P. , Sazhnev, N. P. , Goncharik, V. N. , Garnashevich, G. S. (2004). Production of cellular concrete wares. Theory and practice. Minsk: NPOOO «Strinko», 4-7. 2. Bol'shakov, V. I., Martynenko, V. A., Jastrebcov, V. V. (2006). Production of autoclaved aerated concrete in Ukraine. Stroitel'nye materialy i izdelija, V.4, 8-12. 3. Cabinet of Ministers of Ukraine dated 26 May 2004. Number 684 (2004). Program for production cellular concrete products and their use in construction in 2005-2011 years. Construction materials and products, V.4, 34–37. 4. Zinovkin, V. V., Kulinich, Je. M. (2010). Automated control by the electric drive of double-base dosage of multiparameter technological line of preparation of aircrete . Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «Harkivs'kij politehnicnij institut», V.28, 412–413. 5. Kulinich, Je. M., Mirnyj, V. O., Umerov, Ju. N. (2011). Optimal control of multiparameter process of preparation of aircrete. Computer technology and information systems in electrical engineering. Tol'jatti: Publishing house TGU, 29-37. 6. Kulinich, Je. M., Zinovkin, V. V., Krisan, Ju. A., Arsen'eva, S. I. (2010). Modeling of automated control multi-component dosing process of preparation of aircrete. Visnik Nacional'nogo tehnicnogo

universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut», V. 57, 271–277. 7. Zinovkin, V. V., Kulinich, Je. M. (2009). Modeling of process waste in the production technology of aircrete. Quality strategy for industry and education: Intern. Conf., 6-13 June 2009. Varna, Bulgaria, V. 2, 176 – 179. 8. Dudnikov, E. G. (1987). Automatic control in the chemical industry. Moscow: Himija. 9. Karpuhina, N. V., Pastuhova, K. M., Sviridov, P. A. (2003). Artificial intelligence techniques in problems of operational control and optimization of complex technological systems. Control problems, 3, 21-24. 10. Daffin, R., Paterson, Je., Zener, K. (1972). Geometric programming. Moscow: Mir.

Надійшла (received) 18.12.2014

УДК 044.03; 681.518:061

М. В. ЕВЛАНОВ, канд. техн. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков;
Н. В. ВАСИЛЬЦОВА, канд. техн. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков;
В. А. НИКИТЮК, аспирант, ХНУРЭ, Харьков

МОДЕЛИ ОПЕРАЦИЙ ИНТЕГРАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЕРВИСОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Проведен анализ основных направлений развития сервис-ориентированных информационных систем. Разработаны математические модели операций интеграции описаний отдельных функциональных сервисов в реестр актуальных сервисов информационной системы. Предложен унифицированный метод интеграции отдельных функциональных сервисов, основным преимуществом которого является возможность досрочного прекращения выполнения операции интеграции, если обнаруживается ошибка, вызванная несоответствием описаний сервиса описаниям предметной области

Ключевые слова: информационная система, сервис-ориентированная архитектура, функциональный сервис, интеграция, реестр, онтология

Введение. В соответствии с современными тенденциями в развитии информационных систем (ИС) управления предприятиями и их процессами одним из часто реализуемых подходов к построению ИС корпоративного масштаба является сервис-ориентированная архитектура (Service-Oriented Architecture, SOA). Эта архитектура предполагает построение ИС из набора гетерогенных слабосвязанных компонентов (сервисов) [1]. Поэтому обязательным условием построения и внедрения архитектуры SOA-ИС является использование единой инфраструктуры описания сервисов (репозитория сервисов), разрешенных протоколов доступа и обмена сообщениями, форматов сообщений. Эта инфраструктура образует так называемую интеграционную шину (ИШ) (Enterprise Service Bus – ESB), являющуюся одним из центральных компонентов системы. Она устанавливает единые правила публикации сервисов, управления и информационного взаимодействия между приложениями различных систем, входящих в состав интегрированной системы. Это упрощает управление приложениями и их поддержку, а также снижает риск фрагментации приложений и процессов [2].

Однако на практике руководство предприятия, для которого создается SOA-ИС, склонно забывать о необходимости эффективного управления данными и сервисами SOA-ИС до тех пор, пока не становится слишком поздно [3]. Такое опоздание приводит к неоправданным затратам финансовых и других ресурсов на эксплуатацию отдельных сервисов SOA-ИС предприятия без возможности окупить эти затраты за счет эффекта от эксплуатации SOA-ИС в целом.

© М. В. ЕВЛАНОВ, Н. В. ВАСИЛЬЦОВА, В. А. НИКИТЮК, 2014

Другой, не менее важной проблемой информатизации предприятий, является разнообразие поставщиков и решений на рынке SOA-ИС. Такое разнообразие приводит к тому, что подобные ИС на целом ряде предприятий формируются из разнородных сервисов. Вследствие этого возникает интерес к решению проблемы повышения эффективности использования SOA-ИС в основной деятельности предприятия и к оптимизации затрат расходуемых при этом ресурсов различного рода. Эта задачу не следует считать элементарной или же типовой – есть большое количество практических примеров того, как работы по информатизации предприятия не дают желаемого эффекта или же приводят к излишним затратам. Сказанное позволяет считать проблему управления разнородными сервисами SOA-ИС в значительной степени нерешенной.

Основным направлением решения проблемы управления разнородными сервисами SOA-ИС следует признать модификацию модели реестра сервисов SOA-ИС. В основе современных подходов к описанию реестров сервисов различных производителей находится модель, зафиксированная в стандарте UDDI v. 3.0.2, в которой не предусмотрено хранение структурированных описаний семантики отдельных сервисов [4]. Формализованное описание этой модели приведено одним из авторов в [5, 6]. Поэтому для модификации этой модели в [6] был предложен комплекс моделей семантического представления сервиса, рассмотренный в [7]. Основой для модификации следует избрать агрегаты *bE_description* и *bS_description*. Данные агрегаты, как следует из стандарта UDDI [4], не являются обязательными, а их значения могут определяться создателями сервисов или же специалистами по внедрению и эксплуатации сервисов в рамках SOA-ИС.

Цель работы. Целью работы является разработка моделей операций интеграции функциональных сервисов, основанных на изложенных в [6, 8] результатах модификации модели реестра сервисов SOA-ИС. Под функциональным сервисом следует понимать сервисы, которые обеспечивают реализацию отдельных функций SOA-ИС управления предприятиями и их процессами.

Модели операций интеграции функциональных сервисов. Изложенные в [6, 8] результаты модификации реестра функциональных сервисов и его агрегатов *bE_description* и *bS_description* позволяют значительно модифицировать операции интеграции функциональных сервисов, рассмотренные авторами в [9]. Такая модификация обеспечит целенаправленное изменение содержимого реестра множества актуальных сервисов SOA-ИС путем интеграции в него описаний только тех функциональных сервисов, которые будут необходимы для решения функциональных задач данной SOA-ИС.

Как показано в [9], основные варианты возможных операций интеграции функциональных сервисов в реестр множества актуальных сервисов SOA-ИС сводятся к следующим операциям:

а) добавление в реестр множества актуальных сервисов SOA-ИС описания нового функционального сервиса, которое никак не связано с описаниями множества актуальных сервисов, хранимого в реестре;

б) добавление в реестр множества актуальных сервисов SOA-ИС описания

нового функционального сервиса, который дополняет и/или развивает функциональные возможности одного или нескольких функциональных сервисов, чьи описания уже хранятся в реестре;

в) исключение из реестра множества актуальных сервисов SOA-ИС описания функционального сервиса, чьи функции обработки хранимых данных оказались не востребуемыми ни одним пользователем SOA-ИС или каким-либо другим сервисом.

Условиями реализации первого варианта интеграции являются условия отсутствия в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС следующих описаний:

а) описаний понятий и терминов предметной области добавляемого функционального сервиса;

б) описаний онтологий добавляемого функционального сервиса;

в) традиционных описаний метаданных добавляемого функционального сервиса.

Первое из указанных условий для нового функционального сервиса N_z можно описать следующим образом:

$$bE_description(M_R) \cap bE_description(N_z) = \emptyset, \quad (1)$$

где $bE_description(M_R)$ - модель агрегата $bE_description$ реестра множества актуальных сервисов SOA-ИС, рассмотренная в [6]; $bE_description(N_z)$ - модель агрегата $bE_description$ нового функционального сервиса N_z , добавляемого в реестр, рассмотренная в [6].

Второе из указанных условий для нового функционального сервиса N_z можно описать следующим образом:

$$bS_description(M_R) \cap bS_description(N_z) = \emptyset, \quad (2)$$

где $bS_description(M_R)$ - модель агрегата $bS_description$ реестра множества актуальных сервисов SOA-ИС, рассмотренная в [6]; $bS_description(N_z)$ - модель агрегата $bS_description$ нового функционального сервиса N_z , добавляемого в реестр, рассмотренная в [6].

Третье из указанных условий для нового функционального сервиса N_z предполагает проверку уникальности традиционных описаний агрегатов этого сервиса. Поэтому в соответствии с предложенной в [5, 6] теоретико-категорной моделью реестра функциональных сервисов введем теоретико-множественные описания хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС в виде выражения

$$RFS''(M_R) = \left[\begin{array}{l} (bE(M_R) - bE_description(M_R)), \\ (bS(M_R) - bS_description(M_R)), \\ bT(M_R), tM(M_R), pA(M_R) \end{array} \right] \quad (3)$$

и нового функционального сервиса N_z в виде выражения

$$RFS''(N_z) = \left[\begin{array}{l} (bE(N_z) - bE_description(N_z)), \\ (bS(N_z) - bS_description(N_z)), \\ bT(N_z), tM(N_z), pA(N_z) \end{array} \right], \quad (4)$$

где $(bE(M_R) - bE_description(M_R))$ - описание элемента `uddi:businessEntity` хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС за исключением агрегата `bE_description`, имеющее вид

$$(bE(M_R) - bE_description(M_R)) = \left[\begin{array}{l} businessKey(M_R), \\ bE_discoveryURLs(M_R), \\ bE_name(M_R), \\ bE_description(M_R), \\ bE_contacts(M_R), \\ bE_identifierBag(M_R), \\ bE_categoryBag(M_R), \\ bE_signature(M_R) \end{array} \right]; \quad (5)$$

$(bS(M_R) - bS_description(M_R))$ - описание элемента `uddi:businessService` хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС за исключением агрегата `bS_description`, имеющее вид

$$(bS(M_R) - bS_description(M_R)) = \left[\begin{array}{l} serviceKey(M_R), \\ bS_name(M_R), \\ bS_description(M_R), \\ bS_categoryBag(M_R), \\ bS_signature(M_R) \end{array} \right]; \quad (6)$$

$bT(M_R)$ - описание элемента `uddi:bindingTemplates` хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС; $tM(M_R)$ - описание элемента `uddi:tModels` хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС; $pA(M_R)$ - описание элемента `uddi:publisherAssertion` хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС; $(bE(N_z) - bE_description(N_z))$ - описание элемента `uddi:businessEntity` нового функционального сервиса N_z за исключением агрегата `bE_description`, имеющее вид

$$(bE(N_z) - bE_description(N_z)) = \left[\begin{array}{l} businessKey(N_z), \\ bE_discoveryURLs(N_z), \\ bE_name(N_z), \\ bE_description(N_z), \\ bE_contacts(N_z), \\ bE_identifierBag(N_z), \\ bE_categoryBag(N_z), \\ bE_signature(N_z) \end{array} \right]; \quad (7)$$

$(bS(N_z) - bS_description(N_z))$ - описание элемента `uddi:businessService` нового функционального сервиса N_z за исключением агрегата `bS_description`, имеющее вид

$$(bS(N_z) - bS_description(N_z)) = \begin{bmatrix} serviceKey(N_z), \\ bS_name(N_z), \\ bS_description(N_z), \\ bS_categoryBag(N_z), \\ bS_signature(N_z) \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$bT(N_z)$ - описание элемента `uddi:bindingTemplates` нового функционального сервиса N_z ; $tM(N_z)$ - описание элемента `uddi:tModels` нового функционального сервиса N_z ; $pA(N_z)$ - описание элемента `uddi:publisherAssertion` нового функционального сервиса N_z .

Тогда третье из указанных условий для нового функционального сервиса N_z можно описать следующим образом:

$$RFS''(M_R) \cap RFS''(N_z) = \emptyset. \quad (9)$$

По аналогии с описаниями $RFS''(M_R)$ и $RFS''(N_z)$ введем полное теоретико-множественное описание хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС $RFS(M_R)$ и полное теоретико-множественное описание нового функционального сервиса N_z $RFS(N_z)$. От рассмотренных выше описаний они будут отличаться добавлением агрегата $bE_description$ в выражения (5) и (7), а также агрегата $bS_description$ в выражения (6) и (8) соответственно. Тогда операцию добавления нового функционального сервиса N_z , реализующую первый вариант интеграции, можно представить продукционным правилом следующего вида:

$$\begin{aligned} & \text{если } bE_description(M_R) \cap bE_description(N_z) = \emptyset \\ & \text{и } bS_description(M_R) \cap bS_description(N_z) = \emptyset \\ & \text{и } RFS''(M_R) \cap RFS''(N_z) = \emptyset \\ & \text{то } RFS(M_R) + RFS(N_z) \end{aligned} \quad (10)$$

Как показано выше, операцией реализации второго варианта интеграции является добавление в реестр множества актуальных сервисов SOA-ИС описания нового функционального сервиса, который дополняет и/или развивает функциональные возможности одного или нескольких функциональных сервисов, чьи описания уже хранятся в реестре.

В [9] показано, что выполнение данного варианта интеграции возможно только при выполнении условия, согласно которому в процессе будущей эксплуатации добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z должно происходить хотя бы одно из следующих событий:

а) сервис N_z принимает данные, формируемые эксплуатируемым сервисом s_i , и использует эти данные в процессе своего функционирования;

б) сервис N_z в результате своего функционирования формирует данные, которые впоследствии передает эксплуатируемому сервису s_i ; полученные таким образом данные сервис s_i использует в процессе своего функционирования.

Таким образом, реализация второго варианта интеграции будет возможной при выполнении следующих условий:

а) выполнение описанного выше условия для описаний понятий и терминов предметной области добавляемого/модифицируемого функционального сервиса и хотя бы одного функционального сервиса, описание которого уже хранится в реестре;

б) выполнение описанного выше условия для описаний онтологий добавляемого/модифицируемого функционального сервиса и хотя бы одного функционального сервиса, описание которого уже хранится в реестре;

в) выполнение описанного выше условия для традиционных описаний метаданных добавляемого/модифицируемого функционального сервиса и хотя бы одного функционального сервиса, описание которого уже хранится в реестре.

Для формализованного описания первого из указанных условий введем дополнительные формализованные описания агрегатов $bE_description$ принимающей и передающей частей добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z и реестра функциональных сервисов. Эти описания по аналогии с [6] будут иметь вид:

$$bE_description_r(N_z) = \left(\bigcup_j \langle Id_C_{zj}^r, Name_C_{zj}^r, Description_C_{zj}^r, (R_{C_{zk}^r}^{C_{zj}^r}), (\varphi_{C_{zm}^r}^{C_{zj}^r}) \rangle \right), \quad (11)$$

$$bE_description_t(N_z) = \left(\bigcup_p \langle Id_C_{zp}^t, Name_C_{zp}^t, Description_C_{zp}^t, (R_{C_{zik}^t}^{C_{zp}^t}), (\varphi_{C_{zm}^t}^{C_{zp}^t}) \rangle \right), \quad (12)$$

$$bE_description_r(M_R) = \bigcup_i \left(\bigcup_j \langle Id_C_{ij}^r, Name_C_{ij}^r, Description_C_{ij}^r, (R_{C_{ik}^r}^{C_{ij}^r}), (\varphi_{C_{im}^r}^{C_{ij}^r}) \rangle \right), \quad (13)$$

$$i = \overline{1, n},$$

$$bE_description_t(M_R) = \bigcup_i \left(\bigcup_p \langle Id_C_{ip}^t, Name_C_{ip}^t, Description_C_{ip}^t, (R_{C_{ik}^t}^{C_{ip}^t}), (\varphi_{C_{im}^t}^{C_{ip}^t}) \rangle \right), \quad (14)$$

$$i = \overline{1, n},$$

где $bE_description_r(N_z)$ - обозначение части агрегата $bE_description$, описывающего принимающую часть добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z ; $bE_description_t(N_z)$ - обозначение части агрегата $bE_description$, описывающего передающую часть добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z ; $bE_description_r(M_R)$ - обозначение части агрегата $bE_description$, описывающего принимающие части хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС; $bE_description_t(M_R)$ - обозначение части агрегата

$bE_description$, описывающего передающие части хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС.

Тогда первое из условий выполнения операции добавления/модификации функционального сервиса можно записать в виде выражения

$$\begin{aligned} & [bE_description_r(N_z) \cap bE_description_t(M_R)] \cup \\ & \cup [bE_description_t(N_z) \cap bE_description_r(M_R)] \neq \emptyset \end{aligned} \quad (15)$$

Для формализованного описания второго из указанных условий введем дополнительные формализованные описания агрегатов $bS_description$ принимающей и передающей частей добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z и реестра функциональных сервисов. Эти описания по аналогии с [6] будут иметь вид:

$$bS_description_r(N_z) = \left(\bigcup_j \langle n_{zj}^r, \{ \langle n_{zj}^{xr}, T_{zj}^{xr} \rangle \}, (R_{O_{zk}^r}^{O_{zj}^r}), (\Phi_{O_{zm}^r}^{O_{zj}^r}) \rangle \right), \quad (16)$$

$$bS_description_t(N_z) = \left(\bigcup_p \langle n_{zp}^t, \{ \langle n_{zp}^{xt}, T_{zp}^{xt} \rangle \}, (R_{O_{zk}^t}^{O_{zp}^t}), (\Phi_{O_{zm}^t}^{O_{zp}^t}) \rangle \right), \quad (17)$$

$$bS_description_r(M_R) = \bigcup_i \left(\left(\bigcup_j \langle n_{ij}^r, \{ \langle n_{ij}^{xr}, T_{ij}^{xr} \rangle \}, (R_{O_{ik}^r}^{O_{ij}^r}), (\Phi_{O_{im}^r}^{O_{ij}^r}) \rangle \right) \right), \quad (18)$$

$i = \overline{1, n},$

$$bS_description_t(M_R) = \bigcup_i \left(\left(\bigcup_p \langle n_{ij}^t, \{ \langle n_{ij}^{xt}, T_{ij}^{xt} \rangle \}, (R_{O_{ik}^t}^{O_{ij}^t}), (\Phi_{O_{im}^t}^{O_{ij}^t}) \rangle \right) \right), \quad (19)$$

$i = \overline{1, n},$

где $bS_description_r(N_z)$ - обозначение части агрегата $bS_description$, описывающего принимающую часть добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z ; $bS_description_t(N_z)$ - обозначение части агрегата $bS_description$, описывающего передающую часть добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z ; $bS_description_r(M_R)$ - обозначение части агрегата $bS_description$, описывающего принимающие части хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС; $bS_description_t(M_R)$ - обозначение части агрегата $bS_description$, описывающего передающие части хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС.

Тогда второе из приведенных выше условий выполнения операции добавления/модификации функционального сервиса можно записать следующим выражением:

$$\begin{aligned} & [bS_description_r(N_z) \cap bS_description_t(M_R)] \cup \\ & \cup [bS_description_t(N_z) \cap bS_description_r(M_R)] \neq \emptyset \end{aligned} \quad (20)$$

Третье из приведенных выше условий предполагает проверку уникальности традиционных описаний агрегатов добавляемого/ модифицируемого функционального сервиса N_z и хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС. Поэтому по аналогии с рассмотренной выше операцией реализации первого варианта интеграции введем теоретико-множественное описание хранимого в реестре множества актуальных сервисов SOA-ИС $RFS''(M_R)$ (выражение (3)) и теоретико-множественное описание добавляемого/ модифицируемого функционального сервиса N_z (выражение (4)). Поскольку модель реестра множества актуальных сервисов SOA-ИС не предусматривает уникальных агрегатов для описания принимающей и передающей частей функциональных сервисов, возможно разделение данных описаний на следующие варианты:

а) описание хранимого в реестре множества принимающих частей актуальных сервисов SOA-ИС $RFS_R''(M_R)$;

б) описание хранимого в реестре множества передающих частей актуальных сервисов SOA-ИС $RFS_T''(M_R)$;

в) описание принимающей части добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z $RFS_R''(N_z)$;

г) описание передающей части добавляемого/модифицируемого функционального сервиса N_z $RFS_T''(N_z)$.

При этом данные описания будут в общем случае аналогичны выражениям (3) и (4) соответственно.

Тогда третье из приведенных выше условий выполнения операции добавления/модификации функционального сервиса можно записать следующим выражением:

$$[RFS_R''(N_z) \cap RFS_T''(M_R)] \cup [RFS_T''(N_z) \cap RFS_R''(M_R)] \neq \emptyset. \quad (21)$$

Исходя из выражений (15), (20) и (21), операцию добавления/модификации функционального сервиса N_z , реализующую второй вариант интеграции, можно представить продукционным правилом следующего вида:

$$\begin{aligned} & \text{если } [bE_description_r(N_z) \cap bE_description_t(M_R)] \cup \\ & \cup [bE_description_t(N_z) \cap bE_description_r(M_R)] \neq \emptyset \\ & \text{и } [bS_description_r(N_z) \cap bS_description_t(M_R)] \cup \\ & \cup [bS_description_t(N_z) \cap bS_description_r(M_R)] \neq \emptyset \\ & \text{и } [RFS_R''(N_z) \cap RFS_T''(M_R)] \cup [RFS_T''(N_z) \cap RFS_R''(M_R)] \neq \emptyset \\ & \text{то } RFS(M_R) + RFS(N_z) \end{aligned} \quad (22)$$

Операцией реализации третьего варианта интеграции является удаление из реестра множества актуальных сервисов SOA-ИС описания функционального сервиса, чьи функции обработки хранимых данных оказались невостребованными каким-либо другим сервисом SOA-ИС. В [9] показано, что выполнение данного варианта интеграции возможно только при выполнении условий, согласно

которым решение об исключении функционального сервиса O_z должно приниматься, если происходят следующие события:

- а) в реестре существует описание хотя бы одного функционального сервиса, который передает те же данные, что и исключаемый функциональный сервис O_z ;
- б) в реестре не существует описаний функциональных сервисов, которые принимают данные, передаваемые исключаемым функциональным сервисом O_z .

Таким образом, реализация третьего варианта интеграции будет возможной при выполнении следующих условий:

- а) выполнение описанных в [9] условий для описаний понятий и терминов предметной области исключаемого функционального сервиса и функциональных сервисов, описания которых уже хранятся в реестре;
- б) выполнение описанных в [9] условий для описаний онтологий исключаемого функционального сервиса и функциональных сервисов, описания которых уже хранятся в реестре;
- в) выполнение описанных в [9] условий для традиционных описаний метаданных исключаемого функционального сервиса и функциональных сервисов, описания которых уже хранятся в реестре.

Для формализованного описания первого из указанных условий используем введенные выше дополнительные формализованные описания агрегатов $bE_description$. На их основе сформируем:

- а) дополнительное формализованное описание агрегата $bE_description$ принимающей части исключаемого функционального сервиса O_z $bE_description_r(O_z)$ (описывается выражением, аналогичным выражению (11));
- б) дополнительное формализованное описание агрегата $bE_description$ передающей части исключаемого функционального сервиса O_z $bE_description_t(O_z)$ (описывается выражением, аналогичным выражению (12));
- в) дополнительное формализованное описание агрегата $bE_description$ передающей части актуального функционального сервиса s_i $bE_description_t(s_i)$ (описывается выражением, аналогичным выражению (12)).

Тогда первое из приведенных выше условий выполнения операции исключения функционального сервиса можно записать следующими выражениями:

$$\begin{aligned} & (bE_description_t(s_i) \cap bE_description_t(O_z)) \cap \\ & \cap bE_description(M_R) \neq \emptyset; \end{aligned} \quad (23)$$

$$i, z = \overline{1, n}; i \neq z;$$

$$\begin{aligned} & bE_description(M_R) \cap \\ & \cap (bE_description_t(s_i) \cap bE_description_r(O_z)) = \emptyset; \end{aligned} \quad (24)$$

$$i, z = \overline{1, n}; i \neq z.$$

Для формализованного описания второго из указанных условий используем введенные выше дополнительные формализованные описания агрегатов $bS_description$. На их основе сформируем:

а) дополнительное формализованное описание агрегата $bS_description$ принимающей части исключаемого функционального сервиса O_z $bS_description_r(O_z)$ (описывается выражением, аналогичным выражению (16));

б) дополнительное формализованное описание агрегата $bS_description$ передающей части исключаемого функционального сервиса O_z $bS_description_t(O_z)$ (описывается выражением, аналогичным выражению (17));

в) дополнительное формализованное описание агрегата $bS_description$ передающей части актуального функционального сервиса s_i $bS_description_t(s_i)$ (описывается выражением, аналогичным выражению (17)).

Тогда второе из приведенных выше условий выполнения операции исключения функционального сервиса можно записать следующими выражениями:

$$\begin{aligned} & (bS_description_t(s_i) \cap bS_description_t(O_z)) \cap \\ & \cap bS_description(M_R) \neq \emptyset; \end{aligned} \quad (25)$$

$$i, z = \overline{1, n}; i \neq z;$$

$$\begin{aligned} & bS_description(M_R) \cap \\ & \cap (bS_description_t(s_i) \cap bS_description_r(O_z)) = \emptyset; \end{aligned} \quad (26)$$

$$i, z = \overline{1, n}; i \neq z.$$

Для формализованного описания третьего из указанных условий используем следующие, аналогичные выражению (4), теоретико-множественные описания:

- описание принимающей части исключаемого функционального сервиса O_z $RFS_R''(O_z)$;

- описание передающей части исключаемого функционального сервиса O_z $RFS_T''(O_z)$;

- описание передающей части актуального функционального сервиса s_i $RFS_T''(s_i)$.

Тогда третье из приведенных выше условий выполнения операции исключения функционального сервиса можно записать следующими выражениями:

$$\begin{aligned} & (RFS_T''(s_i) \cap RFS_T''(O_z)) \cap RFS''(M_R) \neq \emptyset; \end{aligned} \quad (27)$$

$$i, z = \overline{1, n}; i \neq z;$$

$$\begin{aligned} & RFS''(M_R) \cap (RFS_T''(s_i) \cap RFS_R''(O_z)) = \emptyset; \end{aligned} \quad (28)$$

$$i, z = \overline{1, n}; i \neq z.$$

Тогда операцию исключения функционального сервиса O_z из реестра, реализующую третий вариант интеграции, можно представить продукционным правилом следующего вида:

$$\begin{aligned}
& \text{если } (bE_description_t(s_i) \cap bE_description_t(O_z)) \cap \\
& \cap bE_description(M_R) \neq \emptyset \\
& u bE_description(M_R) \cap \\
& \cap (bE_description_t(s_i) \cap bE_description_r(O_z)) = \emptyset \\
& u (bS_description_t(s_i) \cap bS_description_t(O_z)) \cap \quad . \quad (29) \\
& \cap bS_description(M_R) \neq \emptyset \\
& u bS_description(M_R) \cap \\
& \cap (bS_description_t(s_i) \cap bS_description_r(O_z)) = \emptyset \\
& u (RFS_T''(s_i) \cap RFS_T''(O_z)) \cap RFS''(M_R) \neq \emptyset \\
& u RFS''(M_R) \cap (RFS_T''(s_i) \cap RFS_R''(O_z)) = \emptyset \\
& \text{то } RFS(M_R) - RFS(O_z).
\end{aligned}$$

Унифицированный метод интеграции функциональных сервисов.

Модели операций интеграции функциональных сервисов (10), (22) и (29) позволяют формализованно описать процесс формирования реестра измененного множества актуальных сервисов как этапа рассмотренной в [10] информационной технологии (ИТ) интеграции разнородных функциональных сервисов как совокупность отображений следующего вида:

$$F_{M_{R'}}^{(M_R, N_z)} : (M_R, N_z) \xrightarrow{(10)} M_{R'}, \quad (30)$$

$$F_{M_{R'}}^{(M_R, N_z)} : (M_R, N_z) \xrightarrow{(22)} M_{R'}, \quad (31)$$

$$F_{M_{R'}}^{(M_R, O_z)} : (M_R, O_z) \xrightarrow{(29)} M_{R'}. \quad (32)$$

Однако такое представление данного этапа требует в ходе реализации ИТ принятия решения о выборе конкретной операции интеграции перед началом обработки описаний каждого отдельного сервиса, поступившего в SOA-ИС на момент начала выполнения процесса интеграции. Кроме того, каждая из моделей операций (10), (22) и (29) по отдельности довольно трудоемка для выполнения. Поэтому становится необходимым создание специального метода, позволяющего сократить количество операций по обработке хранимых в реестре данных и описаний отдельных сервисов.

В основе данного метода находится описанная в [6] модель реестра функциональных сервисов, которая используется для описания реестра множества актуальных сервисов SOA-ИС, отдельных сервисов, поступивших в SOA-ИС на момент начала выполнения процесса интеграции, а также реестра измененного множества актуальных сервисов SOA-ИС. Такая унификация позволяет ввести термин «интегрируемый сервис» S_z , который может описывать:

а) новый сервис N_z , для которого следует выполнить операцию добавления нового функционального сервиса (10);

б) новый сервис N_z , для которого следует выполнить операцию добавления/модификации функционального сервиса (22);

в) исключаемый сервис O_z , для которого следует выполнить операцию исключения функционального сервиса из реестра (29).

Основываясь на данном термине, введем множество $(S_{z_1}, \dots, S_{z_i}, \dots, S_{z_m})$ отдельных сервисов, поступивших в SOA-ИС на момент начала выполнения процесса интеграции. Данное множество позволяет представить операции (10), (22) и (29) следующим образом:

$$\begin{aligned} & \text{если } bE_description(M_R) \cap bE_description(S_{z_i}) = \emptyset \\ & u \ bS_description(M_R) \cap bS_description(S_{z_i}) = \emptyset \\ & u \ RFS''(M_R) \cap RFS''(S_{z_i}) = \emptyset \\ & \text{то } RFS(M_R) + RFS(S_{z_i}) \end{aligned} \quad , \quad (33)$$

$$\begin{aligned} & \text{если } [bE_description_t(M_R) \cap bE_description_r(S_{z_i})] \cup \\ & \cup [bE_description_r(M_R) \cap bE_description_t(S_{z_i})] \neq \emptyset \\ & u [bS_description_t(M_R) \cap bS_description_r(S_{z_i})] \cup \\ & \cup [bS_description_r(M_R) \cap bS_description_t(S_{z_i})] \neq \emptyset \\ & u [RFS_T''(M_R) \cap RFS_R''(S_{z_i})] \cup [RFS_R''(M_R) \cap RFS_T''(S_{z_i})] \neq \emptyset \\ & \text{то } RFS(M_R) + RFS(S_{z_i}) \end{aligned} \quad , (34)$$

$$\begin{aligned} & \text{если } bE_description(M_R) \cap \\ & \cap (bE_description_t(s_i) \cap bE_description_t(S_{z_i})) \neq \emptyset \\ & u \ bE_description(M_R) \cap \\ & \cap (bE_description_t(s_i) \cap bE_description_r(S_{z_i})) = \emptyset \\ & u (bS_description_t(s_i) \cap bS_description_t(S_{z_i})) \cap \\ & \cap bS_description(M_R) \neq \emptyset \\ & u \ bS_description(M_R) \cap \\ & \cap (bS_description_t(s_i) \cap bS_description_r(S_{z_i})) = \emptyset \\ & u (RFS_T''(s_i) \cap RFS_T''(S_{z_i})) \cap RFS''(M_R) \neq \emptyset \\ & u \ RFS''(M_R) \cap (RFS_T''(s_i) \cap RFS_R''(S_{z_i})) = \emptyset \\ & \text{то } RFS(M_R) - RFS(S_{z_i}). \end{aligned} \quad (35)$$

Следует учесть, что выполнение условия $bE_description_t(M_R) \cap bE_description_r(S_{z_i}) \neq \emptyset$ возможно только в случае, если существует хотя бы один сервис $s_i \in M_R$, для которого выполняется это условие. Исходя из этого, процесс принятия решения о выполнении операций интеграции разнородных функциональных сервисов может быть представлен как последовательное применение деревьев решений, показанных на рис. 1 – 3.

Тогда применение унифицированного метода интеграции функциональных сервисов позволит представить отображения (3.51)-(3.53) как частные случаи следующего отображения:

$$F_{M_R'}^{(M_R, (S_{z_1}, \dots, S_{z_m}))} : (M_R, (S_{z_1}, \dots, S_{z_m})) \xrightarrow{\text{(УМИФС)}} M_{R'}, \quad (36)$$

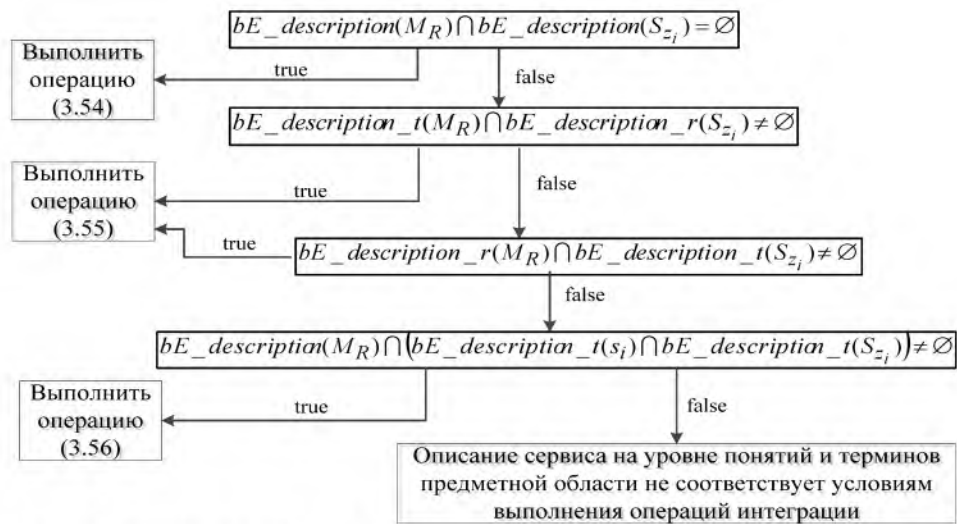


Рис. 1 – Дерево решений по выбору операции интеграции на уровне описаний понятий и терминов предметной области

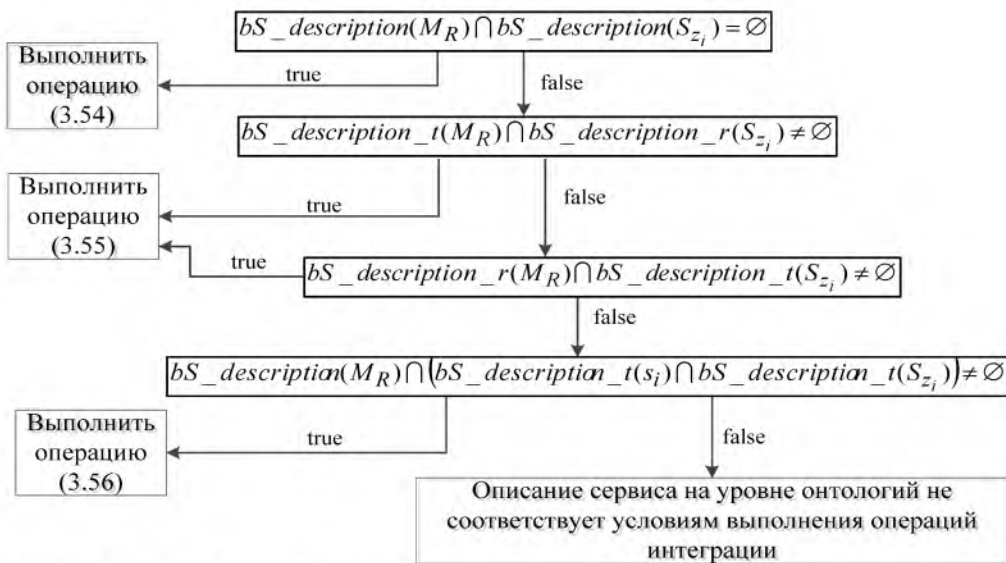


Рис. 2 – Дерево решений по выбору операции интеграции на уровне описаний онтологий

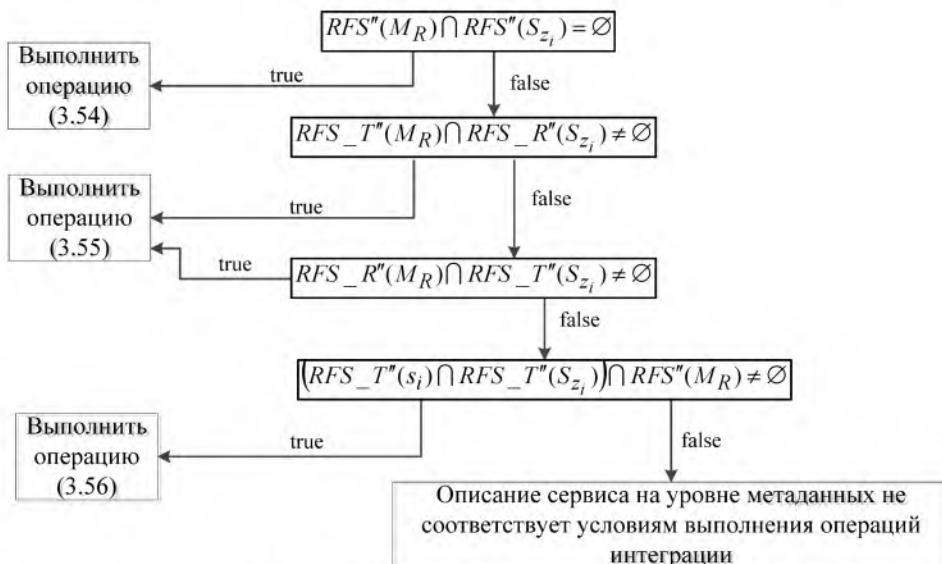


Рис. 3 – Дерево решений по выбору операции интеграции на уровне описаний метаданных

На рис. 3: УМИФС - набор этапов унифицированного метода интеграции функциональных сервисов, выполнение которого приводит к формированию реестра измененного множества актуальных сервисов SOA-ИС.

Подобное представление процесса формирования реестра измененного множества актуальных сервисов SOA-ИС, а также описанные выше деревья решений позволяют описать унифицированный метод интеграции функциональных сервисов как последовательность таких этапов.

Этап 1. Проверка условия $RFS(S_{z_1}, \dots, S_{z_i}, \dots, S_{z_m}) = \emptyset$. Если условие истинно – признать невозможность выполнения операций интеграции вследствие отсутствия описаний интегрируемых функциональных сервисов и прекратить выполнение метода. В противном случае – принять $i = 1$ и перейти к Этапу 2.

Этап 2. Проверка условия $bE_description(S_{z_i}) = \emptyset$. Если условие истинно – признать невозможность выполнения операций интеграции, поскольку сервис не связан с предметной областью объекта автоматизации, и прекратить выполнение метода. В противном случае – перейти к Этапу 3.

Этап 3. Проверка условия $bS_description(S_{z_i}) = \emptyset$. Если условие истинно – признать невозможность выполнения операций интеграции, поскольку входные данные и результаты работы сервиса не связаны с предметной областью объекта автоматизации, и прекратить выполнение метода. В противном случае – перейти к Этапу 4.

Этап 4. Формирование по результатам проверки условий дерева решений, показанного на рис. 1, описания решения о выполнении операции интеграции над сервисом S_{z_i} в виде кортежа

$$Op(S_{z_i}) = \langle op_{bE} \rangle, \quad (37)$$

где $op_{bE} = [1, 2, 3, e_{bE}]$ - идентификатор операции интеграции или сообщения об ошибке описания интегрируемого сервиса на уровне понятий и терминов предметной области.

Этап 5. Модификация по результатам проверки условий дерева решений, показанного на рис. 2, описания $Op(S_{z_i})$ путем его приведения к виду

$$Op(S_{z_i}) = \langle op_{bE}, op_{bS} \rangle, \quad (38)$$

где $op_{bS} = [1, 2, 3, e_{bS}]$ - идентификатор операции интеграции или сообщения об ошибке описания интегрируемого сервиса на уровне онтологий.

Этап 6. Модификация по результатам проверки условий дерева решений, показанного на рис. 3, описания $Op(S_{z_i})$ путем его приведения к виду

$$Op(S_{z_i}) = \langle op_{bE}, op_{bS}, op_{RFS} \rangle, \quad (39)$$

где $op_{RFS} = [1, 2, 3, e_{RFS}]$ - идентификатор операции интеграции или сообщения об ошибке описания интегрируемого сервиса на уровне метаданных.

Этап 7. Проверка для сформированного в ходе выполнения Этапов 4-6 описания $Op(S_{z_i})$ условия $op_{bE} = op_{bS} = op_{RFS}$. Если это условие выполняется –

выполнить операцию интеграции, идентификатор которой зафиксирован в описании $Op(S_{z_i})$ и перейти к Этапу 10. В противном случае – перейти к этапу 8.

Этап 8. Если описание $Op(S_{z_i})$ содержит идентификаторы ошибок, выявленных в ходе проверки условий деревьев решений, то признать невозможность выполнения операций интеграции для данного сервиса с указанием выявленных ошибок и перейти к Этапу 10. В противном случае – перейти к Этапу 9.

Этап 9. Признать невозможность выполнения операций интеграции для данного сервиса по причине несоответствия описаний сервиса S_{z_i} на различных уровнях и перейти к Этапу 10.

Этап 10. Исключить описание сервиса S_{z_i} из рассматриваемого множества описаний $(S_{z_1}, \dots, S_{z_i}, \dots, S_{z_m})$ и принять $i = i + 1$. Если условие $i > m$ не выполняется, то перейти к Этапу 2, иначе признать множество описаний $(S_{z_1}, \dots, S_{z_i}, \dots, S_{z_m})$ рассмотренным полностью и завершить работу метода.

Главной предпосылкой, определяющей возможность применения данного метода, является условие $RFS(M_R) \neq \emptyset$. Это условие определяет существование реестра множества актуальных сервисов SOA-ИС на момент начала выполнения процесса интеграции разнородных функциональных сервисов, в котором присутствуют описания каждого из актуальных сервисов на уровне понятий и терминов предметной области, а также на уровне онтологий.

Выводы. Предлагаемые модели операций интеграции функциональных сервисов (10), (22) и (29) позволяют рассматривать реализацию этих операций путем выполнения запросов к базе данных, реализующей реестр функциональных сервисов SOA-ИС на одном из стандартных языков манипулирования данными. Это, в свою очередь, позволяет реализовать разработанные в данном подразделе модели операций в подавляющем большинстве разрабатываемых или уже эксплуатируемых SOA-ИС без значительного изменения их системного программного обеспечения (в частности СУБД).

Основным преимуществом разработанного унифицированного метода интеграции функциональных сервисов является возможность досрочного прекращения выполнения операции интеграции, если обнаруживается ошибка, вызванная несоответствием описаний сервиса описаниям предметной области. Такая возможность позволит сократить время выполнения метода для неправильно описанных сервисов за счет обработки меньшего объема данных. Кроме того, такая возможность позволит повысить защищенность реестра функциональных сервисов SOA-ИС от несанкционированной записи сервисов различных производителей, назначение которых неизвестно администраторам ИС.

Список литературы: 1. Деревянко А. С. Технологии и средства консолидации информации: учебн. пос. [Текст] / А. С. Деревянко, М. Н. Солощук – Харьков: НТУ "ХПИ", 2008. – 432с. 2. Шаховська Н. Б. Сховища та простори даних: монографія [Текст] / Н. Б. Шаховська, В. В. Пасічник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 244 с. 3. Parikh Ash. SOA в реальности [Электронный ресурс] / Ash Parikh, Murty Gurajada //

Сайт ERPNews. – Режим доступа: <http://erpnews.ru/doc2610.html>. – Заголовок с экрана. **4.** UDDI Version 3.0.2. [Электронный ресурс] // Сайт OASIS (Advancing open standards for the information society). – Режим доступа: http://uddi.org/pubs/uddi_v3.htm#_Точ85907977. – Заголовок с экрана. **5.** Нукитюк В. А. Модель реестра функциональных сервисов информационной системы [Текст] / В.А. Нукитюк // «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку». Збірник тез доповідей науково-практичної конференції 20-21 березня 2013 року. – Харків: Академія внутрішніх військ МВС України, 2013. – С. 80-81. **6.** Нукитюк В. А. Усовершенствование модели реестра web-сервисов [Текст] / В. А. Нукитюк // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – Випуск 5/2014 (88). – С. 98 – 104. **7.** Нукитюк В. А. Модель семантического представления функциональных сервисов [Текст] / В. А. Нукитюк // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 68. – С. 54-62. **8.** Нукитюк В. А. Модель описаний терминов предметной области в сервис-ориентированной информационной системе [Текст] / В. А. Нукитюк // Информационные системы и технологии: материалы 3-й Международ. науч.-техн. конф., Харьков, 15-21 сентября 2014 г.: тезисы докладов. - Харьков: ХНУРЕ, 2014. – С. 68-69. **9.** Евланов М. В. Формализованное описание условий интеграции IT-сервисов в информационную систему управления предприятием [Текст] / М. В. Евланов, Н. В. Васильцова, В. А. Нукитюк // Вісник Академії митної служби України. Серія «Технічні науки». – 2011. – № 2 (46). – С. 87-96. **10.** Нукитюк В. А. Усовершенствование модели процессов интеграции разнородных функциональных сервисов [Текст] / В. А. Нукитюк // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2013): матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 13-16 березня 2013 р.). – Запоріжжя: КПУ, 2013. –С. 180-182.

Bibliography (transliterated): **1.** Derevjanko A. S., Soloschuk M. N. (2008). Technologies and means of consolidating information: tutorial. Kharkov: NTU “KhPI”, 432. **2.** Shakhovska N. B., Pasichnyk V.V. (2009). Data store and data spaces: monograph. Vydavnytstvo natsyonalnoho unyversyteta «Lvivska politehnika», Lviv, Ukraine. 244. **3.** Parikh A. and Gurajada M. (2014). "SOA is a reality", available at: <http://erpnews.ru/doc2610.html>. **4.** Sayt OASIS (Advancing open standards for the information society) / "UDDI Version 3.0.2" (2014). Available at: <http://erpnews.ru/doc2610.html>. **5.** Nykytyuk, V. A. (2013). Registry model of functional services information system. The use of information technology in the preparation of forces and law enforcement. Abstracts of scientific and practical conference. Kharkiv, Akademiya vnutrennykh viysk MVS Ukrayiny, March 20-21, 2013, 80-81. **6.** Nykytyuk, V. A. (2014). Web-service registry model improvements. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Issue 5/2014 (88). 98-104. **7.** Nykytyuk V. A. (2012). Model of semantic representation of functional services. Visnyk natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: «Novi reshenye v suchasnikh tekhnolohiyakh. Kharkiv: NTU «KHPI», no. 68. 54-62. **8.** Nykytyuk V. A. (2014). Model descriptions domain terms in service-oriented information system. Information Systems and Technologies: Proceedings of the 3-th Intern. sci.-techn. conf. Kharkov. 15-21 september 2014: abstracts. Kharkov. KhNURE. 68-69. **9.** Vasylytsova N. V., Ievlanov M. V., Nykytyuk V. A. (2011). A formal description of the conditions of integration IT-services in enterprise information management systems. Visnyk Akademyy mytnoyi sluzhby Ukrayiny. Seriya «Tekhnichni nauky». No. 2 (46). 87-96. **10.** Nykytyuk V. A. (2013). Improvement process model integration of heterogeneous functional services. System analysis. Informatics. Management (SAIU 2013): Proceedings of the IV International Scientific Conference (m. Zaporizhzhya, 13-16 March 2013). Zaporizhzhya. KPU. 180-182.

Надійшла (received) 18.12.2014

УДК 699.842+691.175

В. А. АНДРОНОВ, д-р техн. наук, проф., проректор, Національний університет цивільного захисту України, Харків;

О. М. БУХМАН, викладач, Національний університет цивільного захисту України, Харків

СУЧАСНІ ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ РІВНІВ ПРОФЕСІЙНОЇ ПАТОЛОГІЇ У РОБІТНИКІВ, ЯКІ ПІДЛЯГАЮТЬ ВПЛИВУ ЛОКАЛЬНОЇ ВІБРАЦІЇ

У статті, що є аналізом сучасної наукової та патентної літератури, розглянуто стан питання щодо негативного впливу виробничої локальної вібрації механічних ручних інструментів на рівень професійної захворюваності робітників. Визначені шкідливі фактори, які мають сумісну дію та посилюють негативний вплив локальної вібрації. Показано, що використання вібропоглинаючих мастик на основі епоксидних смол та олігомерів для зниження локальної вібрації ПРИУД методом нанесення на руків'я є перспективним, доцільним та обгрутованим

Ключові слова: ручний механізований інструмент, локальна вібрація, вібраційна патологія, віробезпека.

Вступ. Джерелами локальної (місцевої) вібрації, що передається людині через руки, є ручні механізовані інструменти (РМІ), які розповсюджені у різних галузях сучасної промисловості: гірничорудної - перфоратори, відбійні молотки, гірничі свердла, бурові долота; лісової - сучкорізки, моторні та електропилки; машинобудівельної - рубильні, клепальні молотки, зачистні, шліфувальні та полірувальні машинки, гайковерти; у будівництві - відбійні молотки, бетоноломи [1]. Найважливіша перевага ручних машин – їх висока ефективність у роботі, здатність задовольняти різноманітні умови праці, портативність і маневреність, порівняно невисока вартість, невеликі витрати на експлуатацію. Застосування РМІ дозволяє підвищити продуктивність у 10-15 разів, витрати на придбання ручних машин окупаються за 4-10 тижнів.

При цьому найсуттєвішим недоліком РМІ є створення в процесі роботи небезпечного фактору, що негативно впливає на працездатність людини – оператора ручних машин – локальної вібрації. Подовженій дії локальної вібрації підлягають робітники багатьох професій - забійники, проходчики, гірничі робітники очисних забоїв, обрубники, клепальники, формувальники, полірувальники, бурильники та ін. [3]. Діапазон частот локальної вібрації, що виробляють при роботі механізовані ручні інструменти дуже широкий - від 6 до 1400 Гц та більше. Інтенсивність і характер вібраційних коливань залежить від багатьох факторів.

Мета роботи. Метою дослідження є аналіз сучасної наукової та патентної літератури і стану питання щодо негативного впливу виробничої локальної вібрації механічних ручних інструментів на рівень професійної захворюваності робітників; визначення шкідливих факторів, які мають сумісну дію та посилюють негативний вплив локальної вібрації; здійснення огляду сучасних методів та

засобів зниження вібраційних характеристик пневматичних ручних інструментів ударної дії.

Методика та результати дослідження вібронезбезпеки механізованих ручних інструментів. Аналізом встановлено, що найбільшу частину (більше 60%) усіх сучасних ручних інструментів складають машини, які працюють за принципом ударної дії.

Порівняльна характеристика параметрів вібрації механізованих ручних інструментів показує, що найбільші амплітуди вібрації (0,05-3,1 мм) ударних інструментів (клепальних, рубильних молотків, перфораторів) відповідають основним частотам 25-50 Гц, а інструментів обертальної дії (шліфувально-полірувальних машинок, бензо- та електропил) – частотам 70-800 Гц, але з меншими амплітудами. Таким чином, параметри вібрації пневматичних ударних інструментів, а саме, перфораторів, рубильних, клепальних та відбійних молотків є найбільш небезпечними для людини-оператора.

Пневматичні ручні інструменти ударної дії (ПРІУД) значно легші від електричних, мають більшу енергію ударів. Собівартість їх виготовлення значно нижча тому, що вони менш трудомісткі й не потребують використання дорогих матеріалів. Простота обслуговування і ремонту забезпечують низькі експлуатаційні витрати. Тому у більшості галузей промисловості, в тому числі і машинобудівельній, не зважаючи на вібронезбезпеку, використання ПРІУД є економічно вигідним. Найбільшим недоліком ПРІУД, що обмежує його використання, є висока вібронезбезпека. Вібрації пневматичних ручних інструментів ударної дії спричиняють негативний вплив на організм людини-оператора, що призводить до професійної патології [5].

Внаслідок широкого розповсюдження ПРІУД у різних галузях господарства України і в світі та неможливості їхньої повної заміни у теперішній час сучасним інструментом з більш небезпечними рівнями вібрації, дослідження щодо зниження вібронезбезпеки праці з ним проводяться останні 50 років. Починаючи з 50-х років радянськими, німецькими, польськими та іншими вченими були експериментально досліджені вібрації ручних пневматичних рубильно-клепальних молотків.

Порівнюючи сучасні ручні пневматичні молотки за розміром та енергетичним характеристикам, можна розділити їх на чотири основних групи (табл. 1). Кожна з груп має свої тенденції і рівні їхньої досконалості суттєво відрізняються. Так, найбільш досконалими з пневматичних молотків є відбійні та бурильні, які використовуються при виконанні основних робіт у гірничій промисловості. Рубильні та клепальні молотки використовуються при виконанні другорядних виробничих процесів, тому удосконаленню їхньої конструкції приділялось менше уваги.

На рис. 1 приведені спектри та рівні віброшвидкості в октавних смугах частот для найбільш розповсюджених ПРІУД [2].

Установлено (рис. 1), що спектри коливальної швидкості ПРІУД охоплюють діапазон частот від 10 до 10 000 Гц, які розрізняються між собою як за характером розподілу коливальної енергії по частотним смугам, так і по рівням коливальної швидкості. Так спектри пневматичних перфораторів відрізняються наявністю у спектрі високого рівня (120-145 Дб) низько- та середньо частотних складових і плавним спадом (до 90 Дб) в області високих частот. Для клепальних та

рубильних молотків високий рівень віброшвидкості характерний для низько-, середньо- та високо-частотної областей, тобто їх вібрації характер-ризуються широкосмуговим спектром високих значень віброшвидкості. Очевидно, що умови праці з таким інструментом є найнебезпечнішими навіть за вібраційними характеристиками.

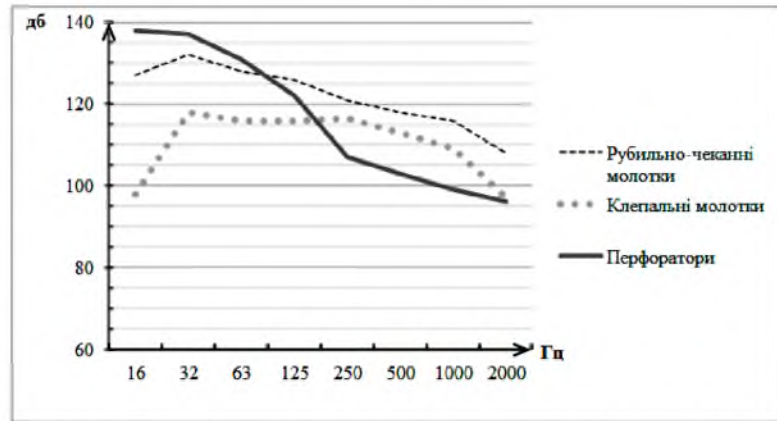


Рис. 1 Рівні віброшвидкості в октавних смугах частот пневматичних ручних інструментів ударної дії

Таблиця 1 – Деякі технічні характеристики сучасних пневматичних молотків

№ з/п.	Групи молотків	Енергія удару, м	Частота ударів за хвилину	Маса, кг	Ударна потужність, к.с.	Витрат повітря, м ³ /хв
1	Чеканно-клепальні	0,2-0,8	1800-3000	до 4	0,1-0,3	0,1-0,5
2	Рубильно-клепальні: легкі середні важкі	0,85-1,5	1900-3500	4-8	0,4-0,7	0,7-1,0
		1,5-2,5	1300-1700	5-9	0,5-0,7	0,8-1,2
		2,5-4,0	800-1200	9-12	0,6-0,7	1,0-1,2
3	Відбійні	3,5-5,0	900-1800	8-10,5	0,7-1,4	1,2-1,4
4	Бурильні: Ручні підтримками глубочні	1,7-2,5	2500-3500	11-14	1,2-1,4	1,7-2,5
		4,0-5,5	1800-2200	17-25	1,8-3,2	2,0-3,5
		5,0-7,0	1700-1200	22-31	2,0-2,4	3,0-3,2

В результаті досліджень встановлено, що параметри вібрації пневматичних молотків значно змінюються в залежності від режиму роботи, виду матеріалу, який обробляється, від технічного стану інструмента, тиску стислого повітря, зусилля подачі, маси інструменту та інших факторів виробничого середовища. Так, при випробуванні рубильних та клепальних молотків встановлено, що при різних зусиллях подачі та величинах тиску стислого повітря в мережі залежність амплітуди вібрації основної частоти від зусилля подачі має складний екстремальний характер. Встановлено, що вібрації корпусу перфоратора мають кореляційний зв'язок з величинами зусилля подачі і тиску стислого повітря: зростання тиску стислого повітря майже у двічі призводить до зростання вібрацій у 1,5-3 рази, а при збільшенні зусилля подачі в 1,6-2 рази рівень вібрації перфоратора зростає у 1,5 рази.

Аналіз великої кількості опублікованих робіт показує, що умови праці робітників, які використовують ПРИУД, характеризуються перш за все наявністю локальної вібрації, яка негативно впливає на робітника в умовах виробництва та у різноманітних поєднаннях з численними виробничими умовами. Так, окрім локальної вібрації на працівників впливають такі шкідливі та небезпечні фактори

як тяжкість трудового процесу (динамічна та статична напруга), мікроклімат (температура приміщення, швидкість руху повітря, атмосферний тиск, вологість повітря) [9], виробничий шум, в тому числі від роботи ПРІУД [2], охолодження та навантаження на верхні кінцівки (температура та теплопровідність матеріалу руків'я), ергономічні характеристики трудового процесу, вміст шкідливих речовин у робочій зоні.

Обговорення результатів дослідження вібронезбезпеки пневматичних ручних інструментів ударної дії та визначення шляхів зниження рівнів професійної патології у робітників. Вібраційна хвороба внаслідок дії локальної вібрації спостерігається у операторів ПРІУД, робота яких супроводжується струсом окремих ділянок тіла у широкому діапазоні частот [9]. Ця форма хвороби характеризується ураженням трьох систем організму: судин, нервів та кісток. Вібрація низьких частот (до 35 Гц) переважно діє на периферичні нервові утворення і кістково-суглобовий апарат. Коливання низьких частот впливають на психологічний стан людини, викликає порушення координації рухів (особливо на частотах 4-11 Гц), а частотний діапазон 4-8 Гц обмежує стійкість до дії вібрації завдяки вібрації внутрішніх органів. Високочастотна вібрація (35 Гц і більше) призводить до спазму судин. Доведено, що низькі коливальні частоти (до 50 Гц) здатні знижувати артеріальний тиск, а високочастотні коливання (до 100 Гц) навпаки, підвищують артеріальний тиск, а також збільшують число серцевих скорочень. Однак найчастіше спостерігається поєднання цих явищ.

Вищезначені форми вібраційних змін в організмі людини, що працює з ручним інструментом дозволяють зробити висновок, що людина-оператор підлягає комбінованій дії локальної та загальної вібрації. Вчені Великобританії, Фінляндії, Італії, Франції, Германії, Швеції, Японії вважають, що більша частка механічної вібрації, яка виникає з силових процесів або ручних інструментів (в тому числі і ПРІУД) поступає в тіло людини крізь пальці або долоні рук [7,8]. Її називають «вібрацією», яка передається через руки (ВІР) та виділяють як основний фактор, що сприяє розвитку вібраційної хвороби. Експериментальним шляхом було показано, що чутливість людини-оператора до вібрації знижується зі збільшенням її частоти [8], найбільш небезпечними вважаються вібраційні коливання з частотою від 100 до 200 Гц, а найбільший дискомфорт викликає вібрація, що діє у вертикальному напрямку.

Професійною патологією операторів ПРІУД вважають захворювання, пов'язані з фізичними навантаженнями верхніх кінцівок, які є досить розповсюдженими, позначаються терміном «неспецифічні порушення рухового апарату руки» та по суті є захворюванням рук від функціонального перенапруження, що є наслідком динамічних, статичних зусиль та локальної вібрації [4]. Відмічається, що найбільш суттєвими несприятливими виробничими факторами для операторів ПРІУД, які прискорюють виникнення професійних захворювань верхніх кінцівок від дії вібрації є тяжкість трудового процесу та дія низьких температур навколишнього середовища [2]. Експериментально встановлено, що пороги вібраційної чутливості змінюються не тільки внаслідок дії вібрації, а також під впливом низької температури навколишнього середовища та динамічного навантаження кінцівок. Доведено, що поєднана дія вібрації та холоду по відношенню до судинної системи призводить до поглиблення ефекту кожного з

них при їх одночасній дії, а також, що низька температура сприяє більш вираженій дії вібрації високих частот на периферичні судини та вібраційну чутливість [2]. Показано, що у хворих вібраційною хворобою від дії локальної вібрації найбільше зниження вібраційної чутливості спостерігається саме у верхніх кінцівках. Динамічне навантаження та охолодження кисті підвищують пороги вібраційної чутливості на 2-3% та 6-15% відповідно на усіх дискретних частотах. Найбільший вплив названих факторів спостерігається в області середніх та високих частот – від 125 Гц і більше.

Таким чином, аналіз дозволяє зробити висновок, що робота з ПРІУД викликає у людини-оператора низку професійних захворювань, які дістали загальну назву «вібраційної хвороби». З'ясовано, що більш виражені патологічні зміни в організмі відбуваються в результаті дії низькочастотних коливань локальної вібрації, які присутні у спектрі роботи ПРІУД.

Особливо небезпечними є професійні захворювання периферичної нервово-м'язової, судинної та кістково-суглобової систем верхніх кінцівок, які посилюються внаслідок дії додаткових факторів, таких як тяжкість трудового процесу та низькі температури навколишнього середовища і руків'я. Дані щодо впливу поєднаної дії локальної вібрації та температури руків'я на розвиток патології верхніх кінцівок в літературі відсутні, в той час як відомо, що тепловий стан поверхні та руків'я ПРІУД під час роботи є нестабільним [5].

В процесі роботи ручного механізованого інструменту вібрація неминуча, але її можливо зменшити та знизити її шкідливий вплив на здоров'я працівників, а можливо й попередити виникнення тяжких професійних захворювань.

Зниження шкідливого впливу локальної вібрації, що виникає при роботі з ПРІУД, можливо за рахунок створення конструкцій віброзахисених інструментів та використанням засобів віброзахисту. Радикальними та перспективними шляхами боротьби з вібрацією є впровадження нових, більш сучасних технологічних процесів з використанням вібронебезпечного обладнання та інструментів, розробка систем дистанційного та автоматизованого управління машинами.

У теперішній час відома велика кількість засобів, які забезпечують у тому чи іншому ступені вібробезпеку ручних інструментів ударної дії. Але всі вони мають низку недоліків. Так, використання індивідуальних засобів – рукавиць та взуття забезпечує захист оператора тільки від коливань з високими частотами; застосування віброізолюючого руків'я потребує ускладнення конструкції інструменту в цілому та збільшення його маси. Впровадження нових сучасних вібробезпечних конструкцій ПРІУД в Україні потребує часу та великих матеріальних затрат. Тому на сьогоднішній день актуальним завданням є пошук порівняно дешевих, нескладних у виконанні способів зниження локальної вібрації існуючих конструкцій ПРІУД, що використовуються на вітчизняних підприємствах.

У попередніх висновках було показано, що шкідливий вплив локальної вібрації ПРІУД на операторів посилюється внаслідок дії додаткових факторів, таких як тяжкість трудового процесу та низькі температури навколишнього середовища і руків'я. Тому дуже важливим є урахування того, що застосування тих чи інших методів та засобів повинно сприяти якнайбільшому зменшенню цих

факторів. Таким чином, завдання ускладнюється необхідністю комплексного підходу до її вирішення. Для вирішення вищезначеної задачі вважається перспективним використання матеріалів на основі полімерів з великим внутрішнім тертям для виготовлення руків'я, рукавиць, прокладок, які встановлюються на шляху розповсюдження вібрації від місця її виникнення до кисті людини-оператора. Тобто розсіювання енергії вібрації відбувається в тілі руків'я і в результаті знижується інтенсивність коливань. Коливальна енергія в процесі вібропоглинання (вібродемпфірування) трансформується в теплову. Таким чином, температура поверхні руків'я в процесі роботи повинна підвищуватись і зменшувати вплив додаткового фактору – низької температури.

У багатьох сучасних ПРІУД, а саме, пневматичних молотках, для досягнення цієї мети служить облицювання руків'я матеріалами на основі пластмас та еластомерів (гуми). Деякі закордонні фірми виготовляють руків'я з гумоподібних матеріалів, наприклад, вулколана. Використовуються також пружні прокладки між корпусом та буртиком інструмента (гасіння енергії удару). Знімні руків'я додаються до інструменту у комплекті та доволі ефективно зменшують інтенсивність локальних вібрацій при роботі. Але з часом вони швидко втрачають вібропоглинальну здатність, мають невелику міцність, руйнуються під впливом вібросилових навантажень і подальша їх експлуатація неможлива, тобто вони недовговічні.

В сучасному виробництві віробезпечних ПРІУД, більшість виробників віддають перевагу використанню вібропоглинаючим покриттям та мастикам на основі полімерів, які наносяться на руків'я інструментів. Перевагою мастик є можливість їх нанесення на будь-яку, в тому числі і на криволінійну поверхню, високі адгезія до металу та тиксотропні властивості, низька токсичність та горючість у сукупності з високими вібропоглинальними властивостями. Мастики з вібропоглинальними властивостями здебільшого виготовляються на основі епоксидних олігомерів та водних дисперсій гомо- і сополімерів вінілацетату.

Встановлено, що мастики на основі епоксидних олігомерів відрізняються підвищеними вібропоглинальними властивостями (у 2-3 рази) та більшою адгезійною міцністю до сталі [10]. При цьому вони мають меншу густину ($\sim 1,4 \text{ г/см}^3$ проти $1,7 \text{ г/см}^3$), що дозволяє зменшити кількість вихідних матеріалів та забезпечити більш економний режим їх використання.

Висновки. Таким чином, в ході аналізу наукових та патентних досліджень встановлено, що використання вібропоглинаючих мастик на основі епоксидних смол та олігомерів для зниження локальної вібрації ПРІУД методом нанесення на руків'я є перспективним, доцільним та обгрутованим:

- по-перше, це дасть можливість зменшити інтенсивність локальної вібрації ПРІУД в місці контакту з людиною (на руків'ї) та знизити вірогідність виникнення низки професійних хворобливих змін в організмі під загальною назвою «вібраційна хвороба»;

- по-друге, використання мастик на основі полімерів допоможе зменшити вплив на людину додаткового фактору, що підсилює негативний вплив вібрації – низької температури руків'я за рахунок перетворення коливальної механічної енергії в теплову в покритті;

- по-третє, з економічної точки зору це доцільно тому, що з'являється можливість удосконалення існуючого інструменту не змінюючи його конструктивно; нанесення захисного покриття є нескладною технологічною задачею і може здійснюватись безпосередньо на підприємстві; експлуатаційні властивості такого засобу віброзахисту значно перевищують показники інших – ці покриття є нетоксичними, довговічними, стійкими до впливу факторів навколишнього середовища, обумовлених експлуатацією (води, температури, механічних навантажень та ін.), не заважають при роботі.

В сучасній науковій літературі дані щодо досліджень цієї проблеми відсутні. Тому підвищення рівня віробезпеки пневматичного ручного інструменту ударної дії за рахунок використання вібропоглинаючої полімерної мастики є важливою науково-практичною проблемою.

Список літератури: 1. *Ефименко, А. В.* Механизированный инструмент [Текст] / *Ефименко А. В., Руквишников Ю. В., Щербак О. В.* – Х.: Изд-во ХНАДУ, 2006. – 188с. 2. Вибрация на производстве [Текст] / под ред. *А. А. Летавета, Э. А. Дрогичиной.* - М.: Медицина, 1971. - 242с. 3. *Тимофеева, И. Г.* Безопасность труда на виброопасных технологических процессах [Текст] / *И. Г. Тимофеева.* – Улан-Уде: Изд-во ВСГТУ, 2003. – 95 с. 4. *Сорокин, Г. А.* Оценка риска функционального перенапряжения рук, связанного с динамическими, статическими усилиями и локальной вибрацией [Текст] / *Г. А. Сорокин, Н. М. Фролова* // Экология человека. – 2012. - №06. – С.13-20. 5. *Глазов, А. Н.* Влияние эксплуатационных параметров на характеристики пневматических молотков [Текст] / *А. Н. Глазов* // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т.310, №2. – С.60-63. 6. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації: ДСН 3.3.6.039-99 / Постанова Головного Державного санітарного лікаря від 1.12.1999 р. №39. - К., 2006. - 48 с. - (МОЗ України, Головне санітарно-епідеміологічне управління). 7. *Griffin, M.* The diagnosis of disorders caused by hand-transmitted vibration: Southampton workshop 2000 [Text] / *Michael Griffin, Massimo Bovenzi* // International Archives of Occupational and Environmental Health. – 2002. – 75, №1-2. – p.1-5. 8. *Bovenzi, M.* Acute effects of continuous and intermittent vibration of finger circulation [Text] / *M. Bovenzi, J. L. Welsh Alexandra, M. J. Griffin* // International Archives of Occupational and Environmental Health. – 2004. – 77, №4. – p. 255 -263. 9. *Николенко В. Ю.* От локальной вибрации до вибрационной болезни [Текст] / *В. Ю. Николенко, Н. Д. Ластикова* // Международный неврологический журнал. – 2011. - №1(39). – С. 1-13. 10. *Андронов, В. А.* Эффективность использования вибропоглощающего полимерного покрытия для снижения локальной вибрации [Текст] / *В. А. Андронов, Ю. М. Данченко, А. В. Скрыпинец, О. М. Бухман* // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. - №6. – С.85-91.

Bibliography (transliterated): 1. *Efimenko, A. V., Rukavishnikov, Y. V. Shcherbak, O. V.,* (2006). Power tool, 188. 2. *Letaveta, A. A., Drogichina, E. A.* (1971). Vibration in the production, 242. 3. *Timofeeva, I. G.* (2003). Safety at jeopardize vibration processes, 95. 4. *Sorokin, G. A, Frolova, N. M.* (2012). Risk assessment of functional overstrain hands associated with dynamic , static forces and local vibration. Human Ecology, 6, 13-20. 5. *Glazov, A. N.* (2007). Influence of operating parameters on the performance of pneumatic hammers. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, V.310, №2, 60-63. 6. Public health standards of production general and local vibration (2006). DSN 3.3.6.039-99. Kyiv, 48. 7. *Griffin, M., Bovenzi, M.* (2000). The diagnosis of disorders caused by hand-transmitted vibration: Southampton workshop International Archives of Occupational and Environmental Health, V. 75, №1-2, 1-5. 8. *Bovenzi, M., Welsh, A., Griffin, M.* (2004). Acute effects of continuous and intermittent vibration of finger circulation. International Archives of Occupational and Environmental Health, V. 77, №4, 255 -263. 9. *Nikolenko, V. Y., Lastikova, N. D.* (2011). From local vibration to vibration disease. International Journal of Neurological, 1(39), 1-13. 10. *Andronov, V. A., Danchenko, U. M. Skrypynets, A. V., Bukhman, O. M.* (2013). The effectiveness of the use of vibration-absorbing polymer coating to reduce local vibration. Scientific Bulletin of National Mining University, 6, 85-91.

Надійшла (received) 17.12.2014

В. М. ІВАСЕНКО, аспірант, НТУУ «КПІ», Київ;

В. П. ПРИМІСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., с. н. с., НТУУ «КПІ», Київ

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ВИКИДІВ АВТОЗАПРАВНИХ СТАНЦІЙ

Проаналізовано особливості впливу роботи автозаправних станцій (АЗС) на довкілля, характеристики джерел утворення і викидів від АЗС. Розглянуті методи газового аналізу і схеми побудови автоматичних газоаналізаторів, що використовуються для контролю стану забруднення атмосфери на АЗС. Розглянуті вдосконалені схеми термokatалітичного, інфрачервоного, полум'яно-іонізаційного газоаналізаторів.

Ключові слова: маса, викид, автозаправна станція, термokatалітичний, газоаналізатор, полум'яно – іонізаційний, інфрачервоний, випаровування, паливо

Вступ. Стрімке зростання автотранспортних засобів приводить до збільшення кількості автозаправних станцій (АЗС). Існуюча мережа АЗС в Україні складає більше 6000 станцій [1]. Кожна АЗС є джерелом викиду забруднюючих речовин (ЗР) [1,2]. Постійно зростаюча кількість АЗС, а також об'єми реалізованого пального передбачає необхідність детального підходу до визначення обсягів і номенклатури викидів шкідливих речовин під час роботи АЗС, впливу функціонування АЗС на довкілля та навколишнє середовище. Ефективно оцінити екологічний стан прилеглої до АЗС території можливо тільки за умов об'єктивного контролю інструментальними засобами, а саме газоаналізаторами, газоаналітичними системами.

Постановка задачі і огляд літературних джерел. Робота АЗС приводить до систематичного, постійного техногенного навантаження на довкілля [1, 2]. Згідно існуючих розрахункових методик визначаються валові викиди забруднюючих речовин (ЗР) з АЗС під час проведення технологічних операцій на АЗС [3, 4]. Розрахункові методики дають інтегрально характеристику загальної маси викиду за певний інтервал часу: с, год, рік, а визначення безпосередньої концентрації ЗР в різних точках території АЗС: санітарно-захисній зоні, сельбищній території повинно проводитись автоматичними газоаналізаторами. Вимоги до технічних характеристик газоаналізаторів в певній мірі носять суперечливий і різноманітний характер. Це пов'язано з тим, що існують різні нормативи: протипожежні, екологічні, санітарно-гігієнічні, охорони праці в яких регламентуються вимоги до газоаналізаторів. Відповідно методи газового аналізу, режими роботи приладів, метрологічні характеристики, конструктивне виконання у газоаналізаторів мають суттєві відмінності і особливості функціонування. Таким чином виникає потреба в диференціації і класифікації автоматичних газоаналізаторів, що використовуються на АЗС для контролю відповідних вищезгаданих нормативів. І що особливо важливо вдосконалення їх технічних характеристик, з урахуванням головної специфіки роботи АЗС: постійного знаходження в атмосфері випаровувань палива [5, 6].

Викиди АЗС : особливості утворення і характеристики викидів. Забруднення довкілля АЗС відбувається за рахунок попадання в атмосферне

повітря випаровувань палива. Викиди випарів палива відбувається: під час заправки ємкостей АЗС від цистерн заправників; зберігання палива в ємкостях; під час безпосередньої заправки автомобілів.

Основними забруднюючими речовинами (ЗР) в процесі експлуатації АЗС при використанні бензину, дизельного палива (ДП) та скрапленого вуглеводневого газу (СВГ) є: бензин, Вуглеводні насичені $C_{12}-C_{19}$ (розчинник РПК-26611 і ін.), пропан, бутан, етан, метан. Безпосередньо джерелами викиду забруднюючих речовин на АЗС під час виконання технологічних операцій є: дихальний клапан резервуару з пальним(організоване джерело), ЗР утворюються під час заправки резервуару з бензовозу, а також при зберіганні в резервуарах; гирло бензобаку (неорганізоване джерело), ЗР утворюються під час заправки баків автомобільні транспортні засоби (АТЗ). На процес випаровування нафтопродуктів з резервуарів в статичних умовах впливають різні фактори: температура навколишнього середовища; тиск і об'єм газового простору; площа контакту нафтопродукту з газовим простором атмосферний тиск.

Загалом втрати нафтопродуктів у вигляді випаровування з резервуарів виникають у результаті «малих та великих» дихань.

Втрати за «малих дихань» спричиняються температурними коливаннями навколишнього середовища. Під час підвищення температури повітря у денний час поверхні резервуарів нагріваються, тиск та температура парогазової суміші наростає, внаслідок цього випаровування нафтопродуктів, особливо легких фракцій, збільшується. Збільшення тиску в парогазовому просторі призводить до спрацювання дихального клапану встановленому в резервуарі і виходу пароповітряної суміші до навколишнього середовища. При цьому важливе значення має ступінь заповнення резервуара нафтопродуктом і пов'язаний з нею об'єм газового простору.

«Великі дихання» виникають під час витиснення пароповітряної суміші до навколишнього середовища у процесі заповнення нафтопродуктом резервуара. При цьому об'єм газового простору зменшується, спрацьовує дихальний клапан. Об'єм «великого дихання» приблизно відповідає кількості нафтопродукту, що потрапив до резервуара. Втрати у разі «великих дихань» зростають під час збільшення кількості циклів «приймання – відвантаження» резервуарів і залежать від кліматичної зони [7].

Методи і прилади для вимірювання викидів типової АЗС. Для вимірювання концентрації вуглеводневих сполук, які надходять у повітря на території АЗС застосовуються наступні методи газового аналізу: хроматографічний, термokatалітичний, полум'яно-іонізаційний, інфрачервоний, фото-іонізаційний. При цьому виникає питання вибору відповідного методу і газоаналізаторів які їх реалізують, залежно від особливостей задач по контролю атмосферного повітря на АЗС залежно від нормативів по яким контролюється атмосфера АЗС: протипожежні, екологічні, санітарно-гігієнічні, охорони праці. Відповідно до цих спеціалізованих вимог і вибирається конкретний метод газового аналізу і газоаналізатори, що їх реалізують.

Протипожежний контроль викидів АЗС. З проведених досліджень [7] впливає необхідність протипожежного контролю випаровувань палива методами експрес-контролю. Як правило для цих цілей використовується термokatалітичний

метод газового аналізу [8]. На основі даного методу випускаються пожежні сигналізатори випаровувань палива на АЗС. Сигналізатори розміщують по периметру станції, вимірювальна інформація надходить на пульт управління для видачі світлового і звукового сигналів. Каталітичне окислення компоненту - парів палива, що визначається, здійснюється на нагрітій каталітично активній нитці при температурі $+300^{\circ}\text{C}$, яка є одночасно чутливим елементом – плечем вимірювального мосту. Основним недоліком існуючих термокаталітичних газоаналізаторів є неможливість його застосування в стаціонарних умовах для безперервного контролю випаровувань горючих газів в атмосфері АЗС. При використанні атмосферного повітря для калібрування нульових показів газоаналізатора, за наявності в атмосфері випаровувань вуглеводнів неможливо встановити нульові покази. Для того щоб провести таке калібрування необхідно повністю припинити роботу АЗС, через певний час повітря очиститься і є можливість встановлення нуля шкали приладу. Але така процедура вимагає значного часу, припинення роботи АЗС, а отже зменшення прибутку і погіршення економічних показників.

На рис. 1 наведена вдосконалена схема термокаталітичного газоаналізатора в якій підвищення точності вимірювання відбувається за рахунок використання атмосферного повітря АЗС в якості нульової калібрувальної суміші [9].

Мостова вимірювальна схема 1, з вимірювальним 2 і компенсаційним 3 термоелементом ; 4- джерелом живлення постійної напруги E_1 4. 5- змінний

резистор 5; 6- підсилювача; 7 – регістратором; 8 – проточна вимірювальна камера. 9- герметична вимірювальна камера; 10- вхідний газопровід, 11- термокамера; 12- спіральний електронагрівач 12, 13- змінне джерело електроживлення E_2 13; 14 – перемикач 14.

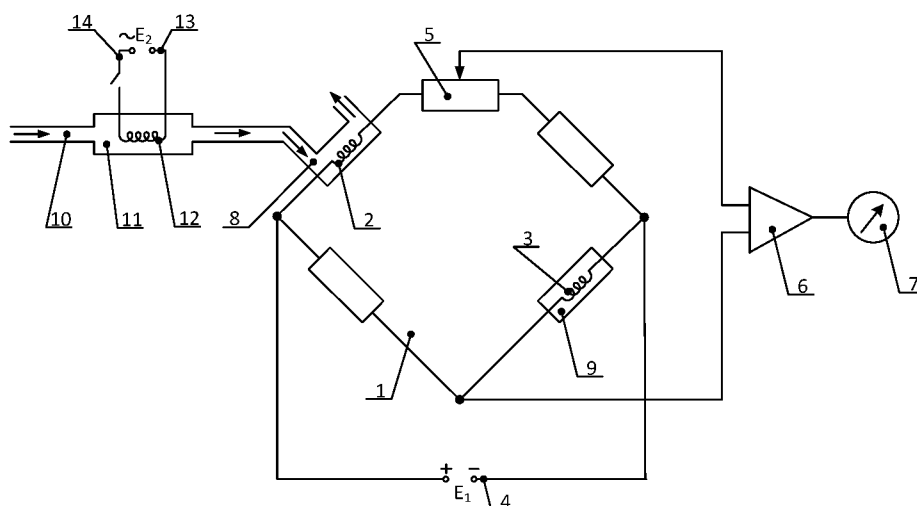


Рис. 1 – Термокаталітичний протипожежний газоаналізатор підвищеної точності

Газоаналізатор працює наступним чином: в штатному, робочому режимі вимірювання, перемикач 14 розімкнутий і на електронагрівач 12 не надходить напруга від джерела живлення E_2 13. Атмосферне повітря з парами палива через газопровід 10, термокамеру 11 надходить у проточну камеру 8, де встановлений вимірювальний термоелемент 2, який є плечем мостової вимірювальної схеми 1. При згоранні парів палива на вимірювальному термоелементі 2 міняється його опір. Відбувається розбаланс мостової вимірювальної схеми 1 у вихідній діагоналі, з'являється напруга пропорційна концентрації парів палива, яка через змінний резистор 5 підсилюється підсилювачем 6 і виводиться на регістратор 7.

В режимі періодичного встановлення нуля шкали приладу перемикач 14

замикається і на електронагрівач 12 (ніхромова або вольфрамова спіраль) подається змінна напруга від джерела живлення 13. Електронагрівач 12 нагрівається до температури 250-300°C на спіралі відбувається повне спалювання парів вуглеводнів і на виході термокамери 11 атмосферне повітря повністю очищається від парів вуглеводнів і інших домішок, тобто на виході термокамери 11 утворюється очищений потік атмосферного повітря, який використовується в якості «нульового» повірочного газу для періодичного встановлення нуля шкали газоаналізатора, зменшення адитивної похибки вимірювання, підвищення точності. Після проведення калібрування нуля шкали перемикач 14 розмикається і прилад працює в штатному режимі.

Таким чином за рахунок спалювання парів вуглеводнів на спіралі електронагрівача утворюється очищений потік атмосферного повітря, який використовується в якості «нульового» повірочного газу таким чином дозволяється досягнути встановлення нуля шкали газоаналізатора без використання спеціального повірочного газу, а також зменшити адитивну похибку вимірювання та підвищити точності вимірювання

Екологічний контроль сумарних вуглеводнів у сельбищній зоні АЗС. Для виміру сумарних вуглеводнів C_nH_m в складі у випаровуваннях АЗС при екологічному контролі рекомендується застосовувати полум'яно-іонізаційному метод газозового аналізу (FID-метод). За допомогою FID-методу, можна створити високочутливий автоматичний газоаналізатор для виміру концентрацій сумарних вуглеводнів на рівні 0,00001 % [10].

Принцип виміру за цим методом полягає в тому, що аналізований газ направляєтьс я у водневе полум'я. При температурі 2000°C відбувається дисоціація молекул вуглеводнів на СН-групи, їх окислення з утворенням вільних електронів та позитивних іонів CHO^* . Якщо до зони водневого горіння прикласти електричне поле, виникає іонізаційний струм, пропорційний кількості СН-груп в молекулі вуглеводню. Полум'яно-іонізаційний перетворювач має більш рівномірну чутливість до різних видів вуглеводних сполук, тому на цей час він прийнятий як стандартний для виміру сумарної кількості вуглеводнів.

Основним недоліком відомого полум'яно-іонізаційних газоаналізаторів є похибка вимірювань при застосування газоаналізатора для екологічного контролю випаровувань палива безпосередньо на АЗС. При застосуванні полум'яно-іонізаційних газоаналізаторів, як найбільш чутливих, з лінійною шкалою, до вимірювання випаровувань вуглеводнів, полум'яно-іонізаційна реакція, яка відбувається в реакційній камері газоаналізатора використовує повітря з атмосфери АЗС. Таким чином пари палива (вуглеводні) в каналі повітря додаються до вуглеводнів каналу проби і виникає суттєва похибка вимірювання.

На рис. 2 наведена розроблена схема удосконаленого полум'яно-іонізаційного газоаналізатору випаровувань палива підвищеної чутливості [11].

Газоаналізатор працює наступним чином: проба, що досліджується по газопроводу проби 7 очищена від механічних домішок відбирається з об'єкту випаровувань за допомогою збудника витрат 9 і надходить до пальника 6 встановленому в реакційній камері 1. Також до газопроводу проби 7 надходить чистий водень по газопроводу водню 10, очищений фільтром 11 і відрегульований по витратам дроселем 12. Суміш водню і проби надходить на пальник 6,

встановлений в реакційній камері 1. В реакційну камеру 1 також надходить повітря по газопроводу повітря 13 очищене фільтром 14. За допомогою спіралі підпалу 3, спіралі при натисканні кнопки перемикача 4, спіраль розігрівається до 300°C від джерела живлення підпалу E_2 5 і суміш проби, повітря, водню підпалюється на виході керамічного пальника 6. Під дією напруги поляризації E_1 15 прикладеної до пальника 6 (на кінці пальника напресовано металеве кільце електрод 6-Е) і через

резистор навантаження 16, другий полюс напруги поляризації E_1 15 приєднаний до колекторного електроду 2, розташованого над пальником 6, виникає струм іонізації. Струм іонізації пропорційний концентрації парів палива через резистор навантаження 16, обробляється (підсилюється, масштабується, переводиться в цифровий код) передається на вихідний прилад 18.

У зв'язку з

наявністю у повітрі об'єкту досліджень (наприклад АЗС, нафтопереробний завод) парів палива - горючих вуглеводнів, вони надходять газопроводом повітря 13 до пальника 6 і приводять до збільшення струму іонізації тобто додаткової похибки вимірювань. Для видалення парів горючих вуглеводнів на газопроводі повітря 13 після фільтру 14, встановлена камера спалювання 19. При замиканні перемикача 21 на спіраль випалу 20 подається напруга від джерела живлення 22. Під дією напруги E_3 спіраль 20 розігрівається до 300-350°C і на цій розігрітій спіралі випалу 20 відбувається випалювання парів палива з газопроводу повітря 13 і на виході камери спалювання 19 утворюється очищене повітря без парів палива, яке надходить до пальника 6. Продукти згоряння палива в камері 19 у вигляді конденсату надходять до збирача конденсату 23 (скляна, керамічна посудина). Струм іонізації буде однозначно пов'язаний з концентрацією парів палива в газопроводі проба 7, в газопроводі повітря 13 пари палива повністю відсутні, адитивна похибка вимірювань ліквідована, чутливість газоаналізатора збільшилась.

Запропонована схема дозволить використовувати полум'яно-іонізаційний газоаналізатор для екологічного моніторингу випаровувань палива у процесах нафтопереробки, АЗС, нафтобазах і інших місцях зберігання, транспортування,

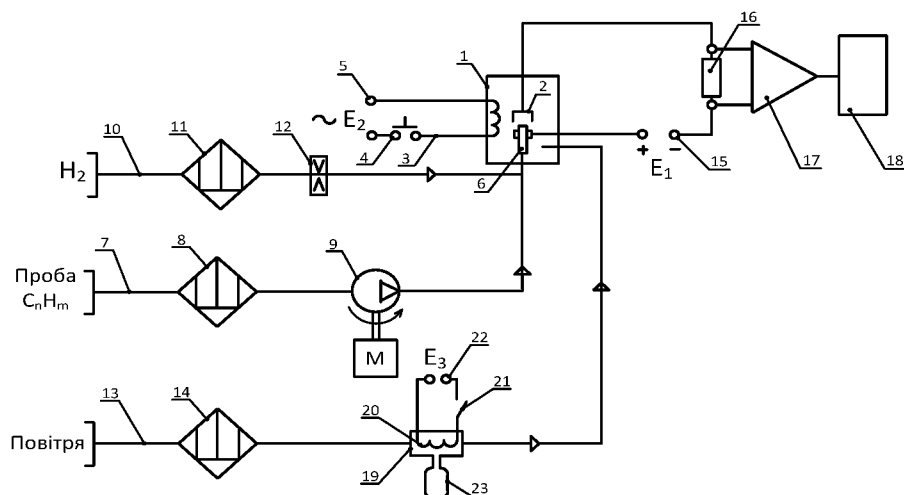


Рис. 2 – Функціональна схема полум'яно – іонізаційного газоаналізатора підвищеної чутливості: 1 – реакційна камера; 2 – колекторний електрод; 3 – спіраль підпалу; 4 – кнопка перемикач; 5 – джерело живлення підпалу; 6 – керамічний пальник; 7 – газопровід проби; 8 – фільтр пиловий; 9 – збудник витрат; 10 – газопровід водню; 11 – фільтр пиловий водневий; 12 – дросель; 13 – газопровід повітря; 14 – фільтр; 15 – джерело живлення поляризації; 16 – резистор навантаження; 17 – схема обробки інформації; 18 – вихідний прилад; 19 – камера спалювання; 20 – спіраль випалу; 21 – вимикач; 22 – джерело живлення; 23 – збирач конденсату

використання паливно-мастильних матеріалів і де необхідний інструментальний контроль рівні випаровувань, для попередження виникнення вибухонебезпечних ситуацій і екологічного моніторингу.

Санітарно-гігієнічний контроль випаровувань на робочих місцях АЗС. Для контролю рівня забруднення випаровувань АЗС на робочих місцях операторів АЗС, застосовується недисперсний інфрачервоний метод газового аналізу, побудований на селективному поглинанні інфрачервоного випромінювання на фіксованій довжині хвилі в інфрачервоному спектрі [7]. Однією з актуальних проблем побудови інфрачервоних газоаналізаторів є необхідність стабілізації х нульових показів. Варіант використання стабілізації нульових показів інфрачервоного газоаналізатора за рахунок електронної корекції електричного живлення представлений на рис. 3 схема стабілізації нульових показів газоаналізатора [12].

Приймач випромінювання PR має два незалежних приймачі: робочий PR_p і порівняльний PR_s , що відпо-відно забезпечується двома різ-ними інтерференційними філь-трами Φ_p і Φ_s . Після виходу на режим сигнал з порівняльного приймача порівнюється з опорною напругою U_{on} .

Якщо сигнал порівняль-ного приймача PR_s відхилиться в ту чи іншу сторону стосовно U_{on} , то виникає різниця між порівняльною й опорною напругою. Цей

дисбаланс напруг підсилюється підсилювачем П і через блок керування (БУ) зменшує або збільшує інтенсивність випромінювання. Таким чином, автоматично вирівнюється сигнал порівняльного каналу, що є «0» стосовно робочого каналу. Тобто відбувається автоматичне коректування нуля за рахунок зміни напруги розжарення випромінювача ДВ, пропорційного зміні температури навколишнього середовища. Така схема дозволила стабілізувати нульові покази на рівні 0,05 % на найбільш чутливому діапазоні 0 – 0,5 мг/м³.

Висновки. Експериментальні дані про рівні викидів 2,0-6,0 т випаровувань палива за рік, на окремі АЗС підтверджують необхідність постійного моніторингу атмосфери. При цьому необхідно контролювати зміни температури і тиску пального під час простою резервуару і враховувати постійну присутність на території АЗС, значного скупчення автомобілів різного класу і типів, які до того ж працюють у найбільш несприятливому режимі холостого ходу, а отже до появи додаткового джерела забруднення і викиду додаткових забруднюючих речовин, продуктів згорання палива.

Для повної оцінки впливу АЗС необхідно виконувати комплекс робіт який включатиме проведення інструментального вимірювання фактичних концентрації в атмосферному повітрі АЗС, за допомогою сучасних газоаналітичних приладів,

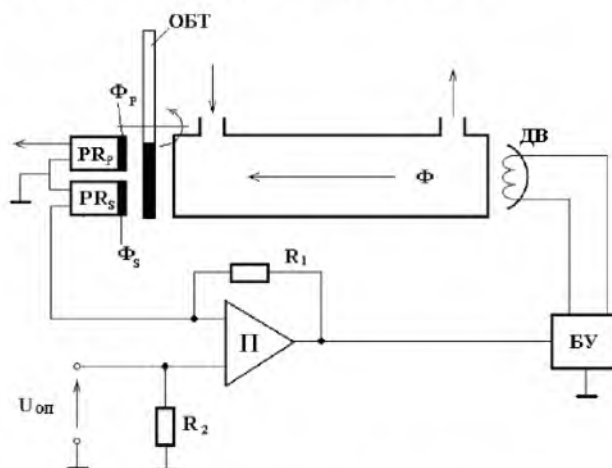


Рис. 3 – Схема корекції нульових показів інфрачервоного газоаналізатора

які реалізують відповідні методи газового аналізу : термokatалітичний, полум'яно-іонізаційний, фото-іонізаційний залежно від нормативів : екологічних, санітарно-гігієнічних, протипожежних, безпеки праці які контролюються на АЗС. Вдосконалений термokatалітичний і полум'яно-іонізаційний методи дозволять проводити вимір концентрацій сумарних випаровувань вуглеводнів від 0,005 мг/м³ до 1000 мг/м³ в автоматичному режимі і компенсацією адитивної складової систематичної похибки .

Список літератури: 1. Swinomatka wordpress [Електронний ресурс] / ринок України: гравці, сфери впливу. – Режим доступу: <http://swinomatka.wordpress.com/>. 2. Волгушев, Ю. В. станции: Оборудование. Эксплуатация [Текст] / Ю. В. Волгушев, А. Н. Сафонов, А. С. Ушаков. – СПб.:ДНК, 2001. – 176 с. 3. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от различных производств [Текст] / Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 196 с. 4. ГСТУ 320.00149943.016-2000. Газы углеводневи скраплені. Методика розрахунку втрат [Текст] / На заміну розділу 8 ГСТУ 320.24370569.009-98; введ. 2000-12-01. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 9 с. 5. Красногорская, Н. Н. Оценка экологической опасности «больших дыханий» резервуаров автозаправочных станций крупного города [Текст] / Н. Н. Красногорская и др. // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 6. – С. 34–38. 6. Франчук, Г. М. Аналіз даних про токсичність паливно-мастильних матеріалів для людини [Текст] / Г. М. Франчук, М. М. Николак // Вісник НАУ. – 2007. – № 3-4 (33). – С. 54–58. 7. Івасенко, В. М. Розрахункова модель випаровувань автозаправних станцій [Текст] / Івасенко, В. М. // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 40 (1083). – С. 51–59. 8. Вартанов А. З. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг [Текст] / А. З. Вартанов, А. Д. Рубан, В. Л. Шкуратник. – М.: «Горная книга», 2009. – 640 с. 9. Івасенко, В. М. Заявка на винахід а201410818, G01N7/16 G. Спосіб аналізу випаровувань палива у повітрі автозаправних станцій / В. М. Івасенко // заявл. 03.10.2014. 10. Приміський, В. П. Стан та перспективи розвитку полум'яно-іонізаційного розвитку для вимірювання концентрації вуглеводнів [Текст] / В. П. Приміський, А. В. Жужа // Метрологія та прилади. - 2013. - №2. - С. 45-52 11. Заявка на винахід а201410822 G01 N 27/62 G. Полум'яно – іонізаційний газоаналізатор випаровувань палива / В. П. Приміський, А. В. Жужа, В. М. Івасенко // заявл. 08.10.2014. 12. Приміський, В. П. Патент України № 69503 G01 N 21/01. Інфрачервоний газоаналізатор / В. П. Приміський // Бюл. винаходів – 2004. - № 9.

Bibliography (transliterated): 1. Swinomatka wordpress. Rinok Ukraïni: gravci, sferi vplivu. Rezhim dostupu: <http://swinomatka.wordpress.com/>. 2. Volgushev, Yu. V., Safonov, A. N., Ushakov, A. S., Volgushev, Yu. V. (2001). Stancii: Oborudovanie. Ekspluatatsiya. SPb.:DNK, 176. 3. Sbornik metodik po raschetu vybrosov v atmosferu zagryaznyayushhix veshhestv ot razlichnyx proizvodstv (1986). Gidrometeoizdat, 196. 4. GSTU 320.00149943.016-2000. Gazi vuglevodnevi skrapleni. Metodika rozrachunku vtrat (2000). Na zaminu rozdilul 8 GSTU 320.24370569.009-98; vved. 2000-12-01. - Kiev : Derzhnaftogazprom, 9. 5. Krasnogorskaya, N. N. (2009). Ocenka ekologicheskoy opasnosti «bolshix dyxanij» rezervuarov avtozapravochnyx stancij krupnogo goroda. Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti, 6, 34–38. 6. Franchuk, G. M., Nikol'yak, M. M., Franchuk, G. M. (2007). Analiz danix pro toksichnist palivno-mastilnix materialiv dlya lyudini. Visnik NAU, 3-4 (33), 54–58. 7. Ivashenko, V. M. (2014). Rozrachunkova model viparovuvan avtozapravnix stancij. Visnik NTU «XPI», № 40 (1083), 51–59. 8. Vartanov, A. Z. Ruban, A. D., Shkuratnik, V. L. (2009). Metody i pribory kontrolya okruzhayushhej sredy i ekologicheskij monitoring. - Moscow: «Gornaya kniga», 640. 9. Ivashenko, V. M. (2014). Zayavka na vinaxid a201410818, G01N7/16 G. Sposib analizu viparovuvan paliva u povitri avtozapravnix stancij, 03.10.2014. 10. Primiskij, V. P., Zhuzha, A. V. (2013). Stan ta perspektivi rozvitku polum'jano-ionizacijnogo rozvitku dlya vimiryuvannya koncentracii vuglevodniv. Metrologiya ta priladi, 2, 45-52 11. Primiskij, V. P., Zhuzha, A. V., Ivashenko, V. M. (2014). Zayavka na vinaxid a201410822 G01 N 27/62 G. Polum'jano – ionizacijnij gazoanalizator viparovuvan paliva, 08.10.2014. 12. Primiskij, V. P. (2004). Patent Ukraïni № 69503 G01 N 21/01. Infrachervonij gazoanalizator. Byul.vinaxodiv, 9.

Надійшла (received) 17.12.2014

УДК 543

Дослідження впливу реконструкції нанопорошку алмазу на адсорбцію іонів міді/ Антоненко Л. П., Хохотва О. П., Задніпрянець Ю. М., Тимошенко В. В., Демишок Т. І., Дзюбак О. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 3–8. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Досліджено адсорбційні властивості нанопорошку алмазу детонаційного синтезу АСУД 99р в статичних умовах. Наведено порівняльну характеристику нанопорошків алмазу АСУД 99р та АСУД 99. Зроблено математичне оброблення кривих адсорбції, використовуючи кінетичні моделі псевдо-першого і псевдо-другого порядку, та розраховані константи швидкості адсорбції.

Ключові слова: порошок алмазу детонаційного синтезу, адсорбція, іони важких металів, кінетика

УДК 621.793.14:543.442.3

Вплив тиску робочої атмосфери на формування вакуумно-дугових покриттів ZrN та (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb)N/ Соболев О. В., Андреев А. О., Сердюк І. В., Горбань В. Ф., Пінчук Н. В., Мейлехов А. О., Дума Є. О., Бабец Д. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 9–14. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Методами рентгенівської тензометрії, електронної мікроскопії, в поєднанні з вимірюванням механічних характеристик мікроіндентування вивчено можливості структурної інженерії покриттів ZrN та (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb)N шляхом впливу тиску робочої атмосфери при осадженні покриттів на їх структуру та властивості. Встановлені умови одержання які призводять до формування надтвердих покриттів з твердістю понад 40 ГПа.

Ключові слова: нітрид цирконію, нітрид високоентропійного сплаву, вакуумно – дуговий випар, покриття, структура, мікротвердість.

УДК 666.762

Дослідження механізму гелеутворення в гібридних гелях кремнезему зі зниженою схильністю до агрегування/ О. Б. Скородумова, А. Ю. Лозовський, О. В. Тарахно, Т. Б. Гонтар // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 14–19. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Досліджено вплив основних технологічних параметрів одержання на гідрофобізацію поверхні частинок гібридних гелів SiO₂ та схильність їх до агрегування. За допомогою інфрачервоної спектроскопії вивчено вплив технологічних особливостей проведення золь-гель переходу на механізм гелеутворення в гібридних гелях системи метилтриетоксисилан – тетраетоксисилан в умовах змінного рН.

Ключові слова: метилтриетоксисилан, тетраетоксисилан, гідроліз, поліконденсація, механізм гелеутворення, схильність до агрегування.

УДК 669.15-198

Підвищення якісних характеристик термоантрацита для виробництва вугільної продукції металургійного призначення/ Цибуля Є. І. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 19–24. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459

Розглянуті показники якості антрациту, який вживається для виробництва вугільної продукції, і їх зміна залежно від температури прожарення. Проведений статистичний аналіз форми шматків антрациту до і після прожарення і розрахована їх питома поверхня. Запропоновано для підвищення якості вугільної продукції металургійного призначення використати термоантрацит високотемпературного прожарення.

Ключові слова: антрацит, термоантрацит, електродна маса, електрокальцинатор, прожарення, температура, питомий електричний опір

УДК 004.2

Використання можливостей VBA для зменшення трудомісткості створення програм / Казак І. О. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 25–31. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

У статті пропонується спосіб автоматичного створення програми за допомогою макрорекордера в VBA на прикладі побудови графіка функції. Програми, що написані таким способом, можна багаторазово використовувати з можливістю їх подальшого редагування, що дозволить зменшити трудомісткість роботи по створенню програм з типовими діями для студентів, інженерів, дослідників.

Ключові слова: програма, макрорекордер, макрос, VBA, графік, аргумент, функція, створення, проект, трудомісткість.

УДК 621.182.2.001.57

Підтримка функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи/ Чайковська Є.Є., Молодковець Б. І. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 31–36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Розроблено метод підтримки процесу зброджування, відвантаження зброженої сировини та завантаження свіжого матеріалу на рівні прийняття рішень. Прогнозування зміни температури зброджування дозволяє використовувати зброжене сусло у якості низькопотенційного джерела енергії для теплового насоса щодо встановлення температури теплоносія, що гріє на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк, при вимірюванні температури теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника.

Ключові слова: когенерація, електрична енергія, теплота, біогаз, зброджування, метантенк, тепловий насос, прийняття рішень

УДК 621.311

Електромагнітна сумісність складноструктурованих електропостачальних систем промислових підприємств/ Бедерак Я. С. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 37–45. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459

Проведено дослідження режиму роботи електропостачальної системи промислового підприємства з здвоєним струмообмежувальним реактором 10 (6) кВ, до однієї вітки якого підключена конденсаторна установка, а до другої – асинхронні електродвигуни, при наявності в системі джерела вищих гармонік. Запропоновані заходи з забезпечення електромагнітної сумісності в таких мережах у різноманітних випадках підключення джерела вищих гармонік до мережі.

Ключові слова: конденсаторна установка, здвоєний струмообмежувальний реактор, вищі гармоніки, резонанс, електромагнітна сумісність.

УДК 621.3.051.025

Прецизійний генератор живлення для комплексів однодротової передачі електричної енергії/ Алексєєв І. А., Садовой О. В., Трикіло А. І., Бабенко М. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 46–51. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

Наведений приклад побудови прецизійного генератора робочої частоти на базі чипу AD 9832 компанії Analog Devices, що реалізує метод прямого цифрового синтезу (DDS) та інвертора напруги, який ним керується, для живлення високочастотних кіл системи однодротової передачі електричної енергії, які підтримують функцію динамічної зміни та установки робочої частоти за цифровим каналом керування.

Ключові слова: частота, генератор, DDS-синтез, високочастотний, однодротова, передача, енергія, система, цифрова, живлення.

УДК 681.5.015.3

Лінеаризація зворотними зв'язками рівнянь динаміки узагальненого електромеханічного об'єкта з диференційними рівняннями спостережуваності/ Волянський Р. С., Садовой О. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХПІ», – 2014. – № 60 (1102). – С. 52–57. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

Огляд робіт, присвячених використанню методів лінеаризації нелінійних рівнянь, показав переваги і недоліки лінеаризації зворотними зв'язками за виходом і визначив мету дослідження. Для досягнення поставленої мети рівняння руху узагальненого електромеханічного об'єкта в псевдоафінній формі доповнені рівняннями фільтра в матричній формі. Шляхом використання методів диференціальної геометрії обґрунтована структура і параметри лінеаризуючого регулятора.

Ключові слова: лінеаризація зворотними зв'язками, динамічна система, нелінійний електромеханічний об'єкт, лінеаризуючий регулятор

УДК 621.311.1.05

Визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів в умовах експлуатації/ Кутін В. М., Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХПІ», – 2014. – № 60 (1102). – С. 57–67. – Бібліогр.: 15назв. – ISSN 2079-5459

Розглянуто існуючі методи та засоби для визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів. Обґрунтовано необхідність вдосконалення методів та засобів технічного діагностування високовольтних вимикачів для підвищення їх надійності в умовах експлуатації. Запропоновано комплексний метод діагностування високовольтних елегазових вимикачів, який враховує контроль струму тестового сигналу, як інтегрального показника при визначенні технічного стану його конструктивних елементів.

Ключові слова: комплексний метод, інтегральний показник, тестовий сигнал, діагностування, сенсор, резонанс.

УДК 621.316

Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах/ Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Малогулко Ю. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХПІ», – 2014. – № 60 (1102). – С. 68–77. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-5459

Розроблено математичну модель оптимального розподілу активного та реактивного навантаження електричних мереж між відновлювальними джерелами електроенергії. Отримано метод формування перспективного плану розвитку електричних мереж з поетапним визначенням оптимальних місць приєднання відновлюваних джерел електроенергії.

Ключові слова: розподілені джерела електроенергії, локальні електричні системи, коефіцієнт чутливості втрат потужності.

УДК 519.6:001.5

Математичні моделі оптимізації параметрів дії лазерного променя на багат шарові біосистеми/ Левкін Д. А. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХПІ», – 2014. – № 60 (1102). – С. 77–84. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459

Для побудови адекватних оптимізаційних математичних моделей, обґрунтована адекватність розрахункових математичних моделей, що описують процес дії променя лазера на багат шарові (N -шарові) мікробіологічні матеріали. З цією метою досліджена багатоточкова крайова задача для багат шарового мікробіологічного середовища і доведена коректність такої задачі при малих обуреннях. Цей результат дозволяє гарантувати адекватність прикладних оптимізаційних математичних моделей.

Ключові слова: адекватність, оптимізаційна модель, лазер, мікробіологічний матеріал, крайова задача, коректність.

УДК 519.21: 004.77

Аналіз ймовірнісних параметрів моделей корпоративних комп'ютерних мереж на основі імітаційного моделювання/ Ієвлєва С. М., Ієвлєв Є. С. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 85–91. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Розглянуто задачу виявлення вузьких місць комп'ютерної корпоративної мережі з використанням коефіцієнта завантаженості елементів, що дозволяє за допомогою методу статистичних випробувань здійснити розбиття елементів, які входять в комп'ютерну мережу по належності їх до критичної, приграничної та робочій зоні; показано, що імітаційне моделювання є важливою частиною систем проектування та управління ККС

Ключові слова: комп'ютерна корпоративна мережа, коефіцієнт завантаженості, вузьке місце, швидкість передачі трафіку, продуктивність.

УДК: 621.31

Перевірка адекватності теплової динамічної моделі асинхронного двигуна, що працює в мережі з неякісною електроенергією/ Кузнецов В. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 92–101. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459

Стаття присвячена оцінці адекватності теплової моделі асинхронного двигуна, що працює в умовах неякісної електроенергії, виконаної за результатами промислового експерименту. Описана методика проведення експерименту. Розраховані середньоквадратичні абсолютні і відносні помилки прогнозу. Для визначення параметрів динамічної теплової моделі виконано нагрів електромеханічного перетворювача під навантаженням і виміряна температура обмотки останнього в цьому вимірі і при його охолодженні у вимкненому стані.

Ключові слова: одномасова тепла динамічна модель, асинхронний двигун, показники якості електроенергії, напруга.

УДК 661.321

Зниження інкрустації дистилятора шляхом зняття пересичення за сульфатом в реакторі-змішувачі відділення дистиляції/ Філоненко Д. В., Райко В. Ф., Шестопапов О. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 102–110. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459

У статті розглянуті причини сульфатної інкрустації відділення дистиляції содового виробництва. Досліджені шляхи зниження кристалізації ангідриту на поверхні дистилера і трубопроводів. Встановлено, що з підвищенням температури і концентрації ангідритної приманки швидкість кристалізації сульфату кальцію зростає. Відгонка частини аміаку і води безпосередньо в змішувачі на барботажних тарілках також сприяє кристалізації ангідриту і прискорює процес зняття пересичення за гіпсом.

Ключові слова: інкрустація апаратури, реактор-змішувач, виробництво соди, дистилер, кристалізація ангідриту.

УДК 628.3:658.512:66.011

Математичне моделювання масоперенесення гексану в порах силікагелю/ Нестеренко О. К., Бойко Т. В., Безносик Ю. О. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 110–116. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

У статті на основі отриманих експериментальних даних, отриманих на лабораторній установці, розглянуто процес масопереносу гексану в порах зерна силікагелю. Показано, що процес масопереносу описується дифузійною моделлю, яка може бути апроксимована на різних ділянках запропонованими математичними залежностями. Розраховано чисельні значення коефіцієнта дифузії та встановлено, що вони не залежать від температури. Визначені швидкості руху газу в порах.

Ключові слова: процес, масопереносу, гексану, дифузійна, модель, зерна, силікагелю, порах, математичними, залежностями.

УДК 621.9.02

Експериментальні дослідження високошвидкісного інструментального затискного патрона/ Ю. М. Кузнєцов, В. А. Недобой, Хамуйєла Ж. А. Гера // Bulletin of NTU "KhPI". Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2014. – № 60 (1102).- P. 117–124. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

В роботі розглянуті результати дослідження силових і жорсткісних характеристик високошвидкісного інструментального затискного патрона. Представлені залежності сили проштовхування і моменту прокручування від тиску затиску, розраховано коефіцієнти підсилення для обох випадків і побудовані графіки їх залежності від тиску затиску. Також був проведений експеримент по визначенню пружних відтискань патрона і представлені залежності радіальної жорсткості і радіальних відтискань від тиску затиску оправок.

Ключові слова: інструментальний затискний патрон, сила проштовхування, момент прокручування, радіальна жорсткість, тиск затиску.

УДК 661.32(04)

Розчинність відкладень гідрокарбонату натрію, що утворюються в карбонізаційних колонах виробництва кальцинованої соди/ Райко В. Ф., Цейтлін М. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 124–129. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

Проведено дослідження розчинності в амонізованому карбонізованому розчині хлориду натрію відкладень NaHCO_3 з карбонізаційних колон виробництва кальцинованої соди. Встановлено, що на кількість NaHCO_3 , що розчинився, впливає, головним чином, вихідна концентрація карбонатних іонів в розчині, а також температура, міра впливу якої посилюється із зростанням концентрації аміаку.

Ключові слова: розчинність, недосичення, гідрокарбонат натрію, амонізований розсіл, карбонатні відкладення

УДК 621.9.06

Гідростатичний сферичний опорний вузол поворотного стола із струменевим приводом мікропереміщень/ Струтинський С. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 130–138. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459

Розроблено схемне і конструктивне рішення опорного вузла поворотного стола, Обґрунтовано метод струменевого регулювання положення сфери, проведені дослідження гідродинамічних процесів у гідростатичних опорах із струменевим регулюванням. Визначено силові характеристики регульованого сферичного опорного вузла в цілому. Встановлено особливості характеристик.

Ключові слова: сфера, вузол, гідростатика, регулювання, струмінь, характеристика

УДК 666.1.031

Дослідження впливу періодів переключення пальників на однорідність температурного поля скловарної печі/ Цапар В.С. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 138–144. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

Проведено дослідження впливу періодів переключення пальників на однорідність температурного поля у скловарній печі. Отримано значення температур у контрольних точках скловарної печі при періодах переключення пальників 20, 30 та 45 хвилин. Визначено необхідність формування критерію оптимальності переключення пальників, котрий визначатиме час переключення в залежності від значень поточних параметрів у печі та навколишнього впливу.

Ключові слова: період переключення пальників, скловарна піч, скляна тара, температурні поля.

УДК 681.513.7:[691.31]

Оптимальне керування розподілом матеріальних потоків технологічної лінії виробництва газобетону / Кулинич Е. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 145–151. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Запропоновано підвищення ефективності керування технологічної лінії приготування газобетону шляхом рішення задачі оптимального розподілу ресурсів з цільовою функцією у вигляді позинома. Обґрунтовано рішення цієї задачі методами геометричного програмування. Оптимальне керування синтезується як розподіл ресурсу енергії по її технологічних апаратах.

Ключові слова: оптимальне керування, технологічна лінія, геометричне програмування, позином, газобетон, матеріальні потоки.

УДК 044.03; 681.518:061

Моделі операцій інтеграції функціональних сервісів в інформаційній системі управління підприємством/ Евланов М. В., Васильцова Н. В., Никитюк В. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 151–166. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Проведено аналіз основних напрямків розвитку сервіс-орієнтованих інформаційних систем. Розроблено математичні моделі операцій інтеграції описів окремих функціональних сервісів в реєстр актуальних сервісів інформаційної системи. Запропоновано уніфікований метод інтеграції окремих функціональних сервісів, основною перевагою якого є можливість дострокового припинення виконання операції інтеграції, якщо виявляється помилка, викликана невідповідністю описів сервісу описам предметної області

Ключові слова: інформаційна система, сервіс-орієнтована архітектура, функціональний сервіс, інтеграція, реєстр, онтологія

УДК 699.842+691.175

Сучасні шляхи зниження рівнів професійної патології у робітників, які підлягають впливу локальної вібрації/ Андронов В. А., Бухман О. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 167–173. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

У статті, що є аналізом сучасної наукової та патентної літератури, розглянуто стан питання щодо негативного впливу виробничої локальної вібрації механічних ручних інструментів на рівень професійної захворюваності робітників. Визначені шкідливі фактори, які мають сумісну дію та посилюють негативний вплив локальної вібрації. Показано, що використання вібропоглинаючих мастик на основі епоксидних смол та олігомерів для зниження локальної вібрації ПРИУД методом нанесення на руків'я є перспективним, доцільним та обґрутованим

Ключові слова: ручний механізований інструмент, локальна вібрація, вібраційна патологія, вібробезпека.

УДК 504.054

Методи і прилади контролю викидів автозаправних станцій/ Івасенко В. М., Приміський В. П. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С. 174-180. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459

Проаналізовано особливості впливу роботи автозаправних станцій (АЗС) на довкілля, характеристики джерел утворення і викидів від АЗС. Розглянуті методи газового аналізу і схеми побудови автоматичних газоаналізаторів, що використовуються для контролю стану забруднення атмосфери на АЗС. Розглянуті вдосконалені схеми термokatалітичного, інфрачервоного, полум'яно-іонізаційного газоаналізаторів.

Ключові слова: маса, викид, автозаправна станція, термokatалітичний, газоаналізатор, полум'яно – іонізаційний, інфрачервоний, випаровування, паливо

УДК 543

Исследование влияния реконструкции нанопорошка алмаза на адсорбцию ионов меди/ Антоненко Л. П., Хохотва А. П., Заднипрянец Ю. Н., Тимошенко В. В., Демышок Т. И., Дзюбак О. Н. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.3–8 – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

Исследованы адсорбционные свойства нанопорошка алмаза детонационного синтеза АСУД 99р в статических условиях. Представлена сравнительная характеристика нанопорошков алмаза АСУД 99р и АСУД 99. Сделана математическая обработка кривых адсорбции, используя кинетические модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка, и рассчитаны константы скорости адсорбции.

Ключевые слова: порошок алмаза детонационного синтеза, адсорбция, ионы тяжелых металлов, кинетика

УДК 621.793.14:543.442.3

Влияние давления рабочей атмосферы на формирование вакуумно-дуговых покрытий ZrN и (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb) N/ Соболев О. В., Андреев А. А., Сердюк И. В., Горбань В. Ф., Пинчук Н. В., Мейлехов А. А., Дума Е. А., Бабец Д. Н. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.9–14. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Методами рентгеновской тензометрии, электронной микроскопии, в сочетании с измерением механических характеристик микроиндентирование, изучили возможности структурной инженерии покрытий ZrN и (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb) N путем воздействия давления рабочей атмосферы при осаждении покрытий на их структуру и свойства. Установлены условия получения, приводящие к формированию сверхтвердых покрытий с твердостью более 40 ГПа.

Ключевые слова: нитрид циркония, нитрид высокоэнтропийного сплава, вакуумно - дуговое испарение, покрытие, структура, микротвердость.

УДК 666.762

Исследование механизма гелеобразования в гибридных гелях кремнезема с пониженной склонностью к агрегированию / О. Б. Скородумова, А. Ю. Лозовской, Е. В. Тарахно, Т. Б. Гонтар // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.14–19. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Исследовано влияние основных технологических параметров получения на гидрофобизацию поверхности частиц гибридных гелей SiO₂ и склонность их к агрегированию. Изучено влияние технологических особенностей проведения золь-гель перехода на механизм гелеобразования в гибридных гелях системы метилтриэтоксисилан – тетраэтоксисилан, в условиях переменного рН.

Ключевые слова: метилтриэтоксисилан, тетраэтоксисилан, гидролиз, поликонденсация, механизм гелеобразование, склонность к агрегированию.

УДК 669.15-198

Повышение качественных характеристик термоантрацита для производства угольной продукции металлургического назначения/ Цыбуля Е. И. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.19–24. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459

Рассмотрены показатели качества антрацита, применяемого для производства угольной продукции, и их изменение в зависимости от температуры прокаливания. Проведен статистический анализ формы кусков антрацита до и после прокаливания и рассчитана их удельная поверхность. Предложено для повышения качества угольной продукции металлургического назначения использовать термоантрацит высокотемпературного прокаливания.

Ключевые слова: антрацит, термоантрацит, электродная масса, электрокальцинатор, прокаливание, температура, удельное электрическое сопротивление

УДК 004.2

Использование возможностей VBA для уменьшения трудоемкости создания программ/ Казак И. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.25–31. – Бібліогр.:10 назв. – ISSN 2079-5459

В статье предлагается способ автоматического создания программы с помощью макрорекордера в VBA на примере построения графика функции. Программы, написанные таким способом, можно многократно использовать с возможностью их дальнейшего редактирования, что позволит уменьшить трудоемкость работы по созданию программ с типичными действиями для студентов, инженеров, исследователей.

Ключевые слова: программа, макрорекордер, макрос, VBA, график, аргумент, функция, создание, проект, трудоемкость.

УДК 621.182.2.001.57

Поддержка функционирования биогазовой установки в составе когенерационной системы/ Чайковская Е. Е., Молодковец Б. И. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.31–36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

азработан метод поддержки процесса сбраживания, отгрузки сброженного сырья и загрузки свежего материала на уровне принятия решений. Прогнозирование изменения температуры сбраживания позволяет использовать сброженное сусло в качестве низкопотенциального источника энергии для теплового насоса с целью установления температуры греющего теплоносителя на входе в теплообменник, встроенный в метантенк, при измерении температуры греющего теплоносителя на выходе из теплообменника.

Ключевые слова: когенерация, электроэнергия, теплота, биогаз, сбраживание, метантенк, тепловой насос, принятие решений

УДК 621.311

Электромагнитная совместимость структурно сложных систем электроснабжения промышленных предприятий / Бедерак Я. С. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.37–45. – Бібліогр.: 12назв. – ISSN 2079-5459

Проведено исследование режима работы системы электроснабжения предприятия со вдвоенным токоограничивающим реактором 10 (6) кВ, к одной ветви которого подключена конденсаторная установка, а ко второй - асинхронные электродвигатели, при наличии в сети источника высших гармоник. Разработаны меры по обеспечению электромагнитной совместимости в таких сетях в различных случаях подключения источника высших гармоник.

Ключевые слова: конденсаторная установка, вдвоенный токоограничивающий реактор, высшие гармоники, резонанс, электромагнитная совместимость.

УДК 621.3.051.025

Прецизионный генератор питания для комплексов однопроводной передачи электрической энергии / Алексеев И. А., Садовой А. В., Трикило А. И., Бабенко М. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.46–51. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Приведен пример построения прецизионного генератора рабочей частоты на базе чипа AD 9832 компании Analog Devices, реализующий метод прямого цифрового синтеза (DDS) и управляемого им инвертора напряжения, для питания высокочастотных цепей системы однопроводной передачи электрической энергии, которые поддерживают функцию контроля, динамического изменения и установки рабочей частоты по цифровому каналу управления.

Ключевые слова: частота, генератор, DDS-синтез, высокочастотный, однопроводная, передача, энергия, система, цифровая, питание.

УДК 681.5.015.3

Линеаризация обратными связями уравнений динамики обобщенного электромеханического объекта с дифференциальным уравнением наблюдаемости/ Волянский Р. С., Садовой А.В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.52–57. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

Обзор работ, посвященных использованию методов линеаризации нелинейных уравнений, показал преимущества и недостатки линеаризации обратными связями по выходу и определил цель исследования. Для достижения поставленной цели уравнения движения обобщенного электромеханического объекта в псевдоаффинной форме дополнены уравнениями фильтра в матричной форме. Путем использования методов дифференциальной геометрии обоснована структура и параметры линеаризующего регулятора.

Ключевые слова: линеаризация обратными связями, динамическая система, нелинейный электромеханический объект, линеаризующий регулятор

УДК 621.311.1.05

Определение технического состояния элегазовых высоковольтных выключателей в условиях эксплуатации/ Кутин В. М., Рубаненко А. С., Мысенко С. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.57–67. – Бібліогр.: 15назв. – ISSN 2079-5459

Рассмотрены существующие методы и средства для определения технического состояния элегазовых высоковольтных выключателей. Обоснована необходимость совершенствования методов и средств технического диагностирования высоковольтных выключателей для повышения их надежности в условиях эксплуатации. Предложен комплексный методы диагностирования высоковольтных элегазовых выключателей, учитывающий контроль тестового тока, как интегрального показателя при определении технического состояния его конструктивных элементов.

Ключевые слова: комплексный метод, интегральный показатель, тестовый сигнал, диагностирование, сенсор, резонанс.

УДК 621.316

Оптимизация функционирования рассредоточенных источников энергии в локальных электрических системах/ Лежнюк П. Д., Рубаненко А. Е., Малогулко Ю. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.68–77. – Бібліогр.: 14назв. – ISSN 2079-5459

Разработана математическая модель оптимального распределения активной и реактивной нагрузки электрических сетей между возобновляемыми источниками электроэнергии. Получен метод формирования перспективного плана развития электрических сетей с поэтапным определением оптимальных мест присоединения возобновляемых источников электроэнергии.

Ключевые слова: распределенные источники электроэнергии, локальные электрические системы, коэффициент чувствительности потерь мощности.

УДК 519.6:001.5

Математические модели оптимизации параметров действия лазерного луча на многослойные биосистемы/ Левкин Д. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.77–84. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459

Для построения адекватных оптимизационных математических моделей, обоснована адекватность расчётных математических моделей, описывающих процесс действия луча лазера на многослойные (N - слойные) микробиологические материалы. С этой целью исследована многоточечная краевая задача для многослойной микробиологической среды и доказана корректность такой задачи при малых возмущениях. Этот результат позволяет гарантировать адекватность прикладных оптимизационных математических моделей.

Ключевые слова: адекватность, оптимизационная модель, лазер, микробиологический материал, краевая задача, корректность.

УДК 519.21: 004.77

Анализ вероятностных параметров моделей корпоративных компьютерных сетей на основе имитационного моделирования/ Иевлева С. Н., Иевлев Е. С. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.85–91. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Рассмотрена задача выявления узких мест компьютерной корпоративной сети с использованием коэффициента загрузки элементов, что позволяет с помощью метода статистических испытаний осуществить разбиение входящих в компьютерную сеть элементов по принадлежности их к критической, пограничной и рабочей зоне; показано, что имитационное моделирование является важной частью систем проектирования и управления ККС

Ключевые слова: компьютерная корпоративная сеть, коэффициент загрузки, узкое место, скорость передачи трафика, производительность.

УДК: 621.31

Проверка адекватности тепловой динамической модели асинхронного двигателя, работающего в сети с некачественной электроэнергией/ Кузнецов В. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.92–101. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459

Статья посвящена оценке адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии, выполненной по результатам промышленного эксперимента. Описана методика проведения эксперимента. Рассчитаны среднеквадратические абсолютные и относительные ошибки прогноза. Для определения параметров динамической тепловой модели выполнено нагрев электромеханического преобразователя под нагрузкой и измерена температура обмотки последнего в этом замеры и при его остывании в выключенном состоянии.

Ключевые слова: однофазная тепловая динамическая модель, асинхронный двигатель, показатели качества электроэнергии, напряжение.

УДК 661.321

Снижение инкрустации дистиллера путем снятия пересыщения по сульфату в реакторе-смесителе отделения дистилляции/ Филоненко Д. В., Райко В. Ф., Шестопалов А. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.102–110. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459

В статье рассмотрены причины сульфатной инкрустации отделения дистилляции содового производства. Исследованы пути снижения кристаллизации ангидрита на поверхности дистиллера и трубопроводов. Установлено, что с повышением температуры и концентрации ангидритной затравки скорость кристаллизации сульфата кальция возрастает. Отгонка части аммиака и воды непосредственно в смесителе на барботажных тарелках также способствует кристаллизации ангидрита и ускоряет процесс снятия пересыщения по гипсу.

Ключевые слова: инкрустация аппаратуры, реактор-смеситель, производство соды, дистиллер, кристаллизация ангидрита.

УДК 628.3:658.512:66.011

Математическое моделирование массопереноса гексана в порах силикагеля/ Нестеренко Е. К., Бойко Т. В., Безносик Ю. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.110–116. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

В статье на основе полученных экспериментальных данных, полученных на лабораторной установке, рассмотрен процесс массопереноса гексана в порах зерна силикагеля. Показано, что процесс массопереноса описывается диффузионной моделью, которая может быть аппроксимирована на разных участках предложенными математическими зависимостями. Рассчитаны численные значения коэффициента диффузии и установлено, что они не зависят от температуры. Определены скорости движения газа в порах.

Ключевые слова: процесс, массопереноса, гексана, диффузное, модель, зерна, силикагеля, порак, математическими, зависимостями.

УДК 621.9.02

Экспериментальные исследования высокоскоростного инструментального зажимного патрона/ Ю. Н. Кузнецов, В. А. Недобой, Хамуйела Ж. А. Герра // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.117–124. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

В работе рассмотрены результаты исследования силовых и жесткостных характеристик высокоскоростного инструментального зажимного патрона. Представлены зависимости силы проталкивания и момента прокручивания от давления зажима, рассчитаны коэффициенты усиления для обоих случаев и построены графики их зависимости от давления зажима. Также был проведен эксперимент по определению упругих отжатий патрона и представлены зависимости радиальной жесткости и радиальных отжатий от давления зажима оправок.

Ключевые слова: инструментальный зажимной патрон, сила проталкивания, момент прокручивания, радиальная жесткость, давление зажима.

УДК 661.32(04)

Растворимость отложений гидрокарбоната натрия, образующихся в колоннах карбонизации производства кальцинированной соды/ Райко В. Ф., Цейтлин М. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.124–129. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

Проведено исследование растворимости в аммонизированном карбонизованном растворе хлорида натрия отложений NaHCO_3 из карбонизационных колонн производства кальцинированной соды. Установлено, что на количество растворившегося NaHCO_3 влияет, главным образом, исходная концентрация карбонатных ионов в растворе, а также температура, степень влияния которой ослабевает с ростом концентрации аммиака

Ключевые слова: растворимость, недосыщение, гидрокарбонат натрия, аммонизированный рассол, карбонатные отложения.

УДК 621.9.06

Гидростатический сферический опорный узел поворотного стола со струйным приводом микроперемещений/ Струтинский С. В. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.130–138. – Бібліогр.: 11назв. – ISSN 2079-5459

Разработано схемное и конструктивное решение опорного узла поворотного стола. Обоснован метод струйной регулировки положения сферы, проведены исследования гидродинамических процессов в гидростатических опорах со струйным регулированием. Определены силовые характеристики регулируемого сферического опорного узла в целом. Установлены особенности характеристик.

Ключевые слова: сфера, узел, гидростатика, регулирования, струя, характеристика

УДК 666.1.031

Исследование влияния периодов переключения горелок на однородность температурного поля стекловаренной печи/ Цапар В. С. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.138–144. – Бібліогр.: 10назв. – ISSN 2079-5459

Проведено исследование влияния периодов переключения горелок на однородность температурного поля в стекловаренной печи. Получены значения температур в контрольных точках стекловаренной печи при периодах переключения горелок 20, 30 и 45 минут. Определена необходимость формирования критерия оптимальности переключение горелок, который будет определять время переключения в зависимости от значений текущих параметров в печи и неблагоприятных условий.

Ключевые слова: период переключения горелок, стекловаренная печь, стеклянная тара, температурные поля.

УДК 681.513.7:[691.31]

Оптимальное управление распределением материальных потоков технологической линии производства газобетона/ Кулинич Э. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.145–151. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Предложено повышение эффективности управления технологической линии приготовления газобетона путем решения задачи оптимального распределения ресурсов с целевой функцией в виде позинома. Обосновано решение этой задачи методами геометрического программирования. Оптимальное управление синтезируется как распределение ресурса энергии по ее технологическим аппаратам.

Ключевые слова: оптимальное управление, технологическая линия, геометрическое программирование, позином, газобетон, материальные потоки.

УДК 044.03; 681.518:061

Модели операций интеграции функциональных сервисов в информационной системе управления предприятием/ Евланов М. В., Васильцова Н. В., Никитюк В. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.151–166. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

Проведен анализ основных направлений развития сервис-ориентированных информационных систем. Разработаны математические модели операций интеграции описаний отдельных функциональных сервисов в реестр актуальных сервисов информационной системы. Предложен унифицированный метод интеграции отдельных функциональных сервисов, основным преимуществом которого является возможность досрочного прекращения выполнения операции интеграции, если обнаруживается ошибка, вызванная несоответствием описаний сервиса описаниям предметной области

Ключевые слова: информационная система, сервис-ориентированная архитектура, функциональный сервис, интеграция, реестр, онтология

УДК 699.842+691.175

Современные пути снижения уровней профессиональной патологии у работников, подвергающихся влиянию локальной вибрации/ Андронов В. А., Бухман О. М. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.167–173. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459

В статье, которая является анализом современной научной и патентной литературы, рассмотрено состояние вопроса относительно негативного влияния производственной локальной вибрации механических ручных инструментов на уровень профессиональной заболеваемости работников. Определены вредные факторы, которые имеют совместное действие и усиливают негативное влияние локальной вибрации. Показано, что использование вибропоглощающих мастик на основе эпоксидных смол и олигомеров для снижения локальной вибрации является перспективным, целесообразным и обгрутованым

Ключевые слова: ручной механизированный инструмент, локальная вибрация, вибрационная патология, вибробезопасность.

УДК 504.054

Методы и приборы контроля выбросов автозаправных станций / Ивасенко В. М., Примиский В. Ф. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х: НТУ «ХП», – 2014. – № 60 (1102). – С.174-180. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459

Проанализированы особенности влияния работы автозаправочных станций (АЗС) на окружающую среду, характеристики источников образования и выбросов от АЗС. Рассмотрены методы газового анализа и схемы построения автоматических газоанализаторов, которые используются для контроля состояния загрязнения атмосферы на АЗС. Рассмотрены усовершенствованные схемы термодаталитического, инфракрасного, пламенно-ионизационного газоанализаторов.

Ключевые слова: масса, выброс, автозаправочная станция, термодаталитический, газоанализатор, пламенно - ионизационный, инфракрасный, испарения

UDC 543

The investigation of impact of diamond nano-powder reconstruction on adsorption of copper ions/ Antonenko L., Khokhotva O., Zadnipyranets Y., Tymoshenko V., Demyshok T., Dziubak O. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 3–8. – Bibliogr.:10 . – ISSN 2079-5459

The problem of water purification from heavy metal ions is not new, but at the same time searching for new methods, technologies and materials suitable for this purpose is a constant subject of study in different countries.

Human activity leads to permanent contamination of surface water, making it impossible to use it for drinking purposes. The use of groundwater in domestic and drinking purposes also raises a number of problems, since they are characterized by a high content of soluble substances, in particular, salts. Moreover, the growing industrial development in some countries leads to wastage of circulating water and leaking of industrial waste into the soil and natural water bodies. Such water typically contains significant amounts of heavy metals such as zinc, copper, chromium, nickel.

The aim of the paper is to investigate the sorption process of Cu^{2+} ions in static conditions from aqueous solutions using nanopowders ASUD 99 and ASUD 99r made according to TY Y 26.8-05417377-177:2007. Nanopowder ASUD 99r differs from ASUD 99 as its surface was reconstructed in order to increase the specific surface of the powder and reduce its ability to aggregate. It was found that after gas-phase reconstruction of nanodiamond ASUD 99 surface its surface area and adsorption capacity increased 1,5 times, as well as pore volume increased 1,7 times. Thus diamond nanopowder (ASUD 99r) with more advanced surface area was obtained, which aqueous suspension was much more stable, compared to ASUD 99.

It was shown that diamond nanopowder ASUD 99r due to higher specific surface area and increased porosity of carbon sp^2 -hybridization had better absorption properties. Mathematical modeling of adsorption curves was done using pseudo-first and pseudo-second order kinetic models, and constants of adsorption rates were calculated.

Keywords: diamond nanopowder, adsorption, heavy metals ions, kinetics

UDC 621.793.14:543.442.3

Effects of working atmosphere pressure on the formation vacuum arc coatings ZrN and (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb) N/ Sobol' O., Andreev A., Serduk I., Gorban' V., Pinchuk N., Meylekhov A., Duma E., Babets D. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 9–14. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Method of X-ray tensometry, electron microscopy, combined with the measurement of the mechanical characteristics of the microindentation, studied the possibility of structural engineering ZrN and (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb) N coatings by influence of working atmosphere pressure on the deposition of coatings on their structure and properties. Determined that the multielement coating and coating ZrN, deposited in nitric atmosphere are the single phase based on cubic fcc lattice (structural type NaCl). In all systems of the coatings deposited at the highest pressure $5 \cdot 10^{-3}$ Torr deformation texture is formed with the axis [111] perpendicular to the surface growth. Establish conditions receive, which lead to the formation of superhard coatings with a hardness of 40 GPa. High resistance to abrasion is determined by complex influence of three factors: the presence of nanogranular state and almost nontextured structure and high microstrain.

Keywords: zirconium nitride, hightentropy nitride alloy, vacuum - arc evaporation, coating, structure, microhardness.

UDC 666.762

Investigation of the mechanism of gelation in hybrid silica gels with reduced propensity for aggregation / O. B. Skorodumova, A.Yu. Lozovskoy, E.V. Tarakhno, T. B. Gontar //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 14–19. – Bibliogr.:10 . – ISSN 2079-5459

The influence of main technological parameters of receipt on the hydrophobization of particles surfaces of hybrid SiO₂ gels and their tendency to aggregate has been studied. Research used the gels methyltriethoxysilane and tetraethoxysilane at a ratio MTEOS/TEOS = 2/1 - 4/1 received by joint hydrolysis in acidic aqueous-alcoholic medium under variable pH. Using infrared spectroscopy, it has been studied the impact of technological characteristics (ratio MTEOS/TEOS, pH and coagulation time) Sol-gel transition on the mechanism of gel formation in hybrid gels system methyltriethoxysilane - tetraethoxysilane. It is established that the presence of methyltriethoxysilane in the initial mixture does not accelerate the hydrolysis of tetraethoxysilane, but has a significant impact on the process of polycondensation products of hydrolysis methyltriethoxysilane and intermediates of the hydrolysis of tetraethoxysilane and the degree of homogeneity of the gel. Uniform distribution of the hydrophobic CH₃ groups between the surface silanol groups prevents the formation of aggregates in the powder silica gel, increases the fluidity of powders and provides high values of their adsorption activity.

Keywords: methyltriethoxysilane, tetraethoxysilane, hydrolysis, polycondensation, the mechanism of gelation, the tendency to aggregation.

UDC 669.15-198

Improving thermoanthracite quality characteristic for production of metallurgical coal destination/ Tsybulya E.I. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 19–24. – Bibliogr.:11. – ISSN 2079-5459

Made an analysis of factors affecting on production characteristics carbon production of metallurgical destination. Shown significant influence on operational characteristics has been providing quality raw materials, used for production carbon products, main thing among of which stands anthracite (thermoanthracite). Considered indicators of anthracite quality, used for the production of metallurgical coal production, and change depending on the calcination temperature. Shown the most important quality indicator of thermoanthracite is specific electric resistance, which greatly depends on anthracite temperature in the furnace heating. It's known that electrical conductivity is substantially affected anthracite most various parameters: calcination temperature, ash content, crystallite size, density, processing time, pressure etc. Therefore, in the analysis of data and analytical dependences are given the influence of temperature on the thermoanthracite specific electrical conductivity. A statistical analysis of the form of anthracite pieces before and after calcination and their specific surface is calculated. Shows graphic dependence of anthracite electrical conductivity (processed at 1600 ° C) from the pressure at measuring of specific electrical conductivity. We obtained experimental dependences of change specific electrical resistance, true density, ash and sulfur content in anthracite, depending on the temperature of calcination. Current proposal is for improving the quality metallurgical coal production purpose use the high temperature calcination thermoanthracite.

Keywords: anthracite, thermoanthracite, electrode mass, electrocalcinator, calcination, temperature, specific electric resistance

UDC 004.2

Using the capabilities of VBA to reduce the complexity of creating programs/ Kazak I. O. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 25–31. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

One way to solve the complexity of creating programs is the ability to automatically create programs using macrorecorder in VBA. The article proposes a way to automatically generate programs using macrorecorder in VBA on the example of graphing functions. In most Microsoft Office programs built a wonderful tool that will allow you to create programs that actually know nothing about programming. This tool is called macrorecorder. If desired, you can make automatically written a program any additions or corrections. Programs written in this way, you can reuse with the possibility of further editing, allowing to reduce the complexity of the work to create programs with typical activities for students, engineers and researchers. Therefore, mastering VBA for Excel, you

can move on to creating macros for other Microsoft software products. Moreover, you will be able to create a full software that uses both functions a variety of applications.

Keywords: a program, macrorecorder, macro, VBA, schedule, argument, function, create, project, the complexity.

UDC 621.182.2.001.57

Support the operation of the biogas plant composed of cogeneration system/ Chaikovskaya E., Molodkovets B. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 31–36. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Method for supporting the process of fermentation, unload fermented of materials and loading of fresh material at the level of decision-making is developed. Prognostication changes in temperature fermentation allows the use of a fermented wort of low- grade energy source for the heat pump to determine the heating temperature of the coolant at the inlet of heat exchanger built into methane tank, when measuring the temperature at the heating medium outlet of the heat exchange. The method developed to support the operation of the biogas plant at the level of decision-making allows, for example, in the production of 352.5 m³ per day of biogas to receive economy biogas of 25.4 thousands m³/year, with increasing marketability of a biogas plant at 13.94% allows under conditions allowing the cogeneration system to reduce production cost of electricity and heat in the range of 20%-30%.

Keywords: cogeneration, electricity, heat, biogas fermentation, methane tank, heat pump, decision-making

UDC 621.311

Electromagnetic compatibility of structure complex systems of power supply on industrial enterprises/ Bederak Ya. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 37–45. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459

The publication is devoted to research mode of power supply systems of industrial enterprises in which a dual current limiting reactor is installed. To the first branch is connected a capacitor installation, and induction motors is connected to the second one. Connection of the source of higher harmonics to the reactor branch with induction motors or to the external circuit can cause resonance of currents or voltages. The calculation sequence of the resonance frequency in both cases of connections of higher harmonics source was determined. Was proposed determination the current in the branch with a capacitor for each harmonic to protect it against overload current at resonance. It was made the conclusion, that the resonant frequency is much greater for the case where the source of higher harmonics is in parallel circuit than it is set in the external circuit. It was developed the mathematical apparatus for monitoring current and voltage in the circuit branches, which is needed for controlling of the resonant frequency in real time.

Keywords: capacitor installation, dual current-limiting reactor, harmonics, resonance, electromagnetic compatibility.

UDC 621.3.051.025

Precision power generator system for a single-wire electric power transmission/ Alekseev I., Sadovoi A., Trikilo A., Babenko M. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 46–51. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

The article contains an example of the construction of precision oscillator operating frequency based of the chip AD 9832 company Analog Devices that implements the method of direct digital synthesis (DDS) and high-frequency power circuit for a system of single-wire electric power transmission which supports functions digital installations of the operating frequency.

The use of DDS frequency synthesizer allows you to build a precision oscillator with a unique digital certainty: the signal generated is synthesized with typical digital systems accuracy. Frequency,

amplitude and phase of the signal at any point in time is precisely known and controlled. DDS is practically not affected by temperature drift and aging.

The use of modern methods and electronic components to building a switching power supplies was possible to achieve a required precision and power generator for the system a single-wire electric power transmission and efficiency of over 90 %.

Keywords: frequency, generator, DDS-synthesis, high-frequency, single-wire, transmission, energy, system, digital, power.

UDC 681.5.015.3

Feedback linearization of generalized electromechanical object dynamic equations with differential observer equation/Voliansky R., Sadovoy A. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 52–57. – Bibliogr.:10 . – ISSN 2079-5459

Analysis of nonlinear equations linearization methods have shown the feedback linearization advantages. Review of papers devoted to the improvement and use of this method, identify gaps feedback linearization by output and established their influence on the original nonlinear object control. Differential equations of generalized electromechanical object motion, and their transformation into a pseudoaffine form are showed. The resulting equations are supplemented with the observer motion equations in a matrix form, and formulated their effect on the controller structure. By the use of matrix calculus and differential geometry methods composed the "object - observer" system motion equation. On their basis are determined the linearizing controller structure. The proposed approach to the determination of the linearizing controller structure is illustrated with an example of the first order electromechanical object with first order output filter. A simplified approach for determining the controller structure based on differential calculus are showed. The structure and parameters of the linearizing controller comply with the control systems symmetry principle.

Keywords: feedback linearization, dynamic system, nonlinear electromechanical object, linearized controller

UDC 621.311.1.05

Definition of technical sf₆ high-voltage switches in operation/ Kutin V., Rubanenko A., Mysenko S. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 57–67. – Bibliogr.:15 . – ISSN 2079-5459

Existing methods and tools for determining the technical condition of gas-insulated high-voltage switches. The necessity of improving the methods and means of technical diagnostics high-voltage switches to enhance their reliability in operation. Over-complex method of diagnosing been proposed high-voltage gas-insulated switch that allows for control of current test signal as an integrated parameter in determining the technical condition of his tools. Complex method conventionally involves four stages of diagnosis, during which the frequency of the test signal changes from zero to megahertz. Control current test signal as integral index, and comparing it with the reference values obtained during commissioning or repairs to reasonably certain time intervals makes it possible to determine the change technical condition of its structural elements during operation. The algorithm of complex method of diagnosing sulfur hexafluoride switches, which can increase the quality of diagnosis and reduce its time by imposing on camera test signal contacts of different frequencies.

Keywords: complex method, integral factor test tone, diagnostics, sensor, response.

UDC 621.316

Optimization of functioning of distributed energy sources in the local electric systems/ Lezhniuk P., Rubanenko O., Malohulko Y. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 68–77. – Bibliogr.:14. – ISSN 2079-5459

The method for determining the sensitivity coefficients of power losses in branches to change the generation of distributed energy sources (DES) in local electrical systems (LES) was improved. It allows to estimate the sensitivity of total power loss in LES as optimality criterion of modes and

power losses in some branches of electric networks to generate changes in the nodes with DER. It is shown the dependence of sensitivity coefficients of power losses in branches from the voltage in the nodes of LES with DER. It was proposed the using of generalized indicators of efficiency design solutions of power issuing scheme with DES in the LES. An algorithm for determining the generalized indicators of functioning power network with the criterion of minimum active power losses and determine the optimal installed capacity of renewable energy in LES was done. It is shown that the using of generalized indicators of efficiency design solutions of power issuing scheme with DES allows to obtain the sufficiently effective schemes of power network with DER.

Keywords: distributed energy sources, local electrical systems, power losses sensitivity coefficients.

UDC 519.6:001.5

Mathematical models of optimization parameters laser beam on a laminated biosystems/

Levkin D. A. //Bulletin of NTU "KhPI". Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2014. – № 60 (1102).- P. 77–84. – Bibliogr.:11 . – ISSN 2079-5459

To build an adequate optimization of mathematical models, proved the adequacy of the calculation of the mathematical models describing the process steps of the laser beam on the multi-layer (N -layer) microbiological materials. This purpose is investigated multipoint boundary value problem for multilayer microbiological environment and proved the correctness of this problem at small oborona. This result ensures the adequacy of applied mathematical optimization models. Mathematical model the basic optimization problem that is multi-dimensional, unsteady, nonlinear and beatocello objective optimization of process parameters of laser local thermal effects on multilayer microbiological material subject to the restrictions on the resulting temperature field of biomaterial. Made formalization and systematization of applied optimization problems, which are long-term cases, the underlying optimization problem. The specific features of their mathematical models, which allowed well-grounded selection of numerical methods and software and hardware implementations. Proposed and investigated the modification of the search engine optimization method, which takes into account the peculiarities of mathematical models based on the composition of numerical methods, which create a computational structure.

Keywords: adequacy, optimization models, boundary value problems, , correctness, implementation models, laser, segmentation, microbiological material.

UDC 519.21 : 004.77

Analysis of probabilistic parameters of the model of corporate computer networks based simulation/ Iievlieva S. M., Iievliev Ie. S. //Bulletin of NTU "KhPI". Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2014. – № 60 (1102).- P. 85–91. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

One of the current problems in the design and management of the corporate computer network is the task of identifying bottlenecks. To solve it, you can use this characteristic performance of the network as a data transmission rate. Obviously, the data transfer rate is a random variable and depends on many factors, both internal and external.

In this paper, we consider the problem of identifying bottlenecks computer corporate network using a load factor of elements that allows using the method of statistical tests to carry out a partition within the computer network elements according to their belonging to the critical, border and work area.

The article shows that the current unit of statistical modeling can be used as one of the main methods for calculating the parameters of computer networks with random assessments of the time packet data on the elements of a corporate computer network.

Keywords: computer corporate network, load factor, the bottleneck, the transmission rate of traffic performance.

UDC 621.31

Check of adequacy of the thermal dynamic model of the asynchronous motor working in the conditions of the unquality electric power/ Kuznetsov V. //Bulletin of NTU "KhPI". Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2014. – № 60 (1102).- P. 92–101. – Bibliogr.:15. – ISSN 2079-5459

The article is sanctified to the estimation of adequacy of thermal model of asynchronous engine, working in the conditions of off-grade electric power executed on results an industrial experiment. Methodology of realization of experiment is described. The root-mean-square absolute and relative errors of prognosis are expected. The got results testify to adequacy to an offer onemass thermal model of asynchronous engine working in networks with off-grade electric energy. Taking into account that for many types of engines in certificate literature information is absent about the coefficients of heat emission and heat capacity, and on separate led only thermal permanent to time, the values of the indicated parameters of model can be got on the methodology used in the article. For determination of parameters of thermal model it is suggested to conduct heating of certain asynchronous engine with a shortcircuited rotor on-loading and to take temperature puttee in this measuring and at the cooling-down of engine in the turned off state. An offer methodology is tested in practice in the conditions of experimental workshop of limit liability company "Ukrspetssservis".

Keywords: onemass thermal dynamic model, asynchronous engine, indexes of quality of electric power, tension.

UDC 661.321

Decline of encrustation of distiller by the continuous supersaturation relieving on sulfate in the reactor-mixer of distillation department/ Filonenko D. V., Rayko V. F., Shestopalov O. V. //Bulletin of NTU "KhPI". Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2014. – № 60 (1102).- P. 102–110. – Bibliogr.:18. – ISSN 2079-5459

The reasons of sulfate encrustation of department distillation of ash production are considered in the article. The ways of decline of crystallization of anhydrite are investigational on-the-spot distiller and pipelines. Research of continuous supersaturation relieving on CaSO_4 in distiller retention time 5-120 minutes. Experiments showed that use of vapour-liquid injector as a primary mixer and heater of reagents, before their serve in an industrial reactor-mixer executing the function of liquidator supersaturation relieving on CaSO_4 . It is set that with increasing temperature and concentration of anhydrite inoculating speed of crystallization of calcium sulfate increases. Distillation part of ammonia and water directly in a mixer on bubble-type piattis is also instrumental in crystallization of anhydrite and accelerates a process continuous supersaturation relieving on CaSO_4 . Exposed, that the ways of improvement of construction of reactor-mixer are analysed for the decline of anhydrite concentration.

Keywords: encrustation of apparatus, reactor-mixer, ash production, distiller, crystallization of anhydrite.

УДК 628.3:658.512:66.011

Mathematical modeling of mass transfer of hexane in silica gel pores/ Nesterenko E., Boyko T., Beznosyk Iu. //Bulletin of NTU "KhPI". Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2014. – № 60 (1102).- P. 110–116. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

The transfer rate of the active substance to the surface in heterogeneous catalytic processes can be limited by the diffusion of reactants to the surface of the particles and diffusion of the reactants in the pores of the grains of the catalyst. Such diffusion braking process is usually accompanied by complications with the heat of reaction, which leads to temperature changes inside of the porous grains of the catalyst, as well as between the surface of the particles and the flow of reagents

In this article, on the basis of experimental data obtained with the help of the laboratory equipment the process of hexane mass transfer in the pores of the grains of silica gel had been studied. It was shown that the process of mass transfer is described by the diffusion model that can be approximated by the proposed mathematical dependencies at various areas. It was determine the

numerical values of the kinetic component of the process of mass transfer, namely the speed of motion of the gas in the pores. Calculated numerical values of the coefficient of diffusion of hexane in the pores of silica gel.

Keywords: the process, of mass transfer, hexane, diffusion, pattern, grain, silica gel, pore, mathematical dependencies

UDC 621.9.02

Experimental study high-speed instrumental clamping chucks/ Y. Kuznetsov, V. Nedoboi, Hamuyela J. A. Guerra //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 117–124. – Bibliogr.:10 . – ISSN 2079-5459

The paper discusses the results of a study of power and stiffness characteristics of high-speed tool chuck. The experiments were performed using high-precision mandrel clamped in the chuck at different clamping pressure. The chuck was mounted on a lathe using transition elements. According to the results of these experiments were presented dependence of the push force and the moment scroll by clamping pressure, calculated gains for both cases and plot their dependence on the clamping pressure. Also, an experiment was conducted to determine the elastic wrung chuck and shows the dependence of the radial stiffness of the pressure clamping mandrels. Radial squeezing determined by cyclic loading and unloading of the mandrel. Were plotted graph radial squeezing from the load-unloading. On the graphs show that stiffness and force characteristics depend on the clamping force of the mandrel in the chuck and when increase in clamp force improved characteristics.

Key words: instrumental clamping chuck, power push, the moment scroll radial stiffness, pressure clamp.

UDC 661.32(04)

Dissolution of sodium hydrocarbonate sediments forming in carbonization columns in soda-ash production/ Raiko V., Tseitlin M. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 124–129. – Bibliogr.:10 . – ISSN 2079-5459

The present research studies the solvability of NaHCO_3 sediments forming in carbonization columns in soda-ash production by ammonized carbonized solution of sodium chloride. The amount of sodium hydrocarbonate that is transferred to the ammonized solution of sodium chloride during the dissolution of the sediments (undersaturation) varies, depending on the temperature and concentration of ammonia compounds, from 0.18 mol/L under 30°C and 2 mol/L of ammonia compounds in terms of ammonia up to 0.62 mol/L under 60°C and 5 mol/L of ammonia. The total concentration of ammonia compounds influences sodium hydrocarbonate solubility only under temperatures above 40°C . Additionally, sodium hydrocarbonate solubility is also influenced by the total concentration of carbonate compounds and carbamate in the solution. However, it only becomes substantial when it reaches 1.5-1.6 mol/L, when the dissolution of sodium hydrocarbonate ceases. When the total concentration of carbonate compounds and carbamate (in terms of CO_2) ranges from 0.6 to 0.9 mol/L, this factor's influence is not detected. Thus, regardless of liquid's temperature, to facilitate the dissolution of NaHCO_3 sediments, the total concentration of carbon dioxide in it should not exceed 1.5 mol/L.

Keywords: dissolution, undersaturation, sodium hydrocarbonate, ammonized brine, carbonate sediments.

UDC 621.9.06

Hydrostatic spherical node reference turntable with jet drive, micrometric movements / Strutynskiy S. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 130–138. – Bibliogr.:11 . – ISSN 2079-5459

Developed schematic and design decision support unit of the turntable with a jet-driven micro movements. Shows the design of the support unit and the basic details of prototyping. Justified method to adjust the scope of the support unit by the action of the jet stream in the fluid flow at the

exit slits hydrostatic bearing elements. Investigations of hydrodynamic processes in hydrostatic bearings with a jet pressure control. The characteristic flow region and the velocity distribution in the gap. Calculations of hydraulic flow parameters in the crevices. The conditions of dynamic equilibrium of the sphere and determined force characteristics adjustable spherical support unit as a whole. The features of the characteristics of their agreement with the experimental data. The conclusions about the performance of the developed spherical support assembly of the turntable.

Keywords: area unit, hydrostatics, regulation, of stream, characteristic

UDC 666.1.031

Study of periods switch burner for uniformity of temperature field furnace/ Tsapar V. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 138–144. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

The influence of switching periods burners uniformity of the temperature field in the furnace. We describe a direct relationship between the uniformity of temperature fields and indicators of quality glassware. A simulation of glass furnace at different periods of switching burners. The value of the temperature in the furnace control points when switching periods burners 20, 30 and 45 minutes. Analysis of the data showed that increasing the switching period burners leads to an increase in the average temperature in the appropriate locations. On the other hand, increasing the switching period burners results in lower efficiency regenerators. Since determining the optimal time to switch the burners are multifactorial problem, which should take into account, as the requirements for temperature uniformity of the glass, and the requirements for effective use of regenerators, prospects for future research included encouraging certain optimality criterion switching burners, which determine the switching depending on the values of the current parameters in the oven and environmental impact.

Keywords: time switch burners Glassmaking furnace, glass containers, temperature fields

UDC 681.513.7:[691.31]

Optimal control by distribution of material flows of aircrete production technological line / Kulinich E. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 145–151. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

There is offered an improvement of the effectiveness of control of aircrete production technological line by means of solution to a problem of optimal allocation of resources with an objective function in the form of pozinom. Optimal control is synthesized as distribution of an energy resource to its technological devises. The solution to this task by geometric programming methods was proved. Optimal control is synthesized as the distribution of energy resource to its technological devices. When using pozinomial integrand in the optimal control of aircrete preparation task, the method of Pontryagin can be used, by this a maximum of Hamilton function is determined by taking into account the maximum value of the integrand, which can be easily found by help of geometric programming.

Keywords: optimal control, technological line, geometrical programming, by technological process, pozinom, aircrete, material flows.

UDC 044.03; 681.518:061

Model of operations of integration of functional services in information system of enterprise management/ Ievlanov M., Vasiltsova N., Nykytiuk V. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 151–166. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

The analysis of the major trends in the development of service-oriented information systems. The mathematical models of operations integration of individual functional descriptions of services in the register of current services information system are developed. Authors determined the conditions of operations integration services. The features of these operations for different units of service registry. The proposed model operations allow us to consider the implementation of these operations

by querying the database, implementing a service registry, in one of the standard data manipulation language. The unified method of integration of individual functional services is used. The main advantage of this method is the possibility of early termination of the operation of integration, if there are errors caused by the mismatch of service descriptions domain description. Such a possibility would reduce the execution time of the method described for the wrong service by processing less data.

Keywords: information system, service-oriented architecture, functional service, integration, registry, ontology

UDC 699.842+691.175

Modern approaches to occupational diseases incidence reduction in workers dealing with local vibration/ Andronov V., Bukhman O. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 167–173. – Bibliogr.:10 . – ISSN 2079-5459

Upon analysis of the available scientific and patent literature it becomes evident that the use of vibration-absorbing mastic (based on epoxy resins and oligomers) in order to reduce local vibration by applying to the handle of a tool is a promising, feasible and reasonable approach. It provides an opportunity to reduce the intensity of local vibration at the point of a contact with a worker (the handle of the tool) and in turn to reduce the likelihood of the occupational conditions development, called «vibration disease». The use of resin-based polymers is also able to reduce the direct impact of low temperature on the hands of a worker, which is a well-known additional factor enhancing the negative impact of vibration. This happens due to mechanical vibrational energy conversion into heat in the coating.

Key words: pneumatic hand tool, local vibration, vibration disease, vibration safety, vibration hazard.

UDC 504.054

Methods and emission control devices petrol stations/ Ivasenko V., Primiskiy V. //Bulletin of NTU “KhPI”. Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. – № 60 (1102).- P. 174-180. – Bibliogr.:12. – ISSN 2079-5459

It was analyzed specific influence of petrol stations operating on environment, features of creation's sources and emissions of petrol stations. It was taken a look on methods of gas analysis and schemes of building of automatic gas analyzers, which are used at petrol stations for atmosphere's pollution control. It was taken a look on a improved scheme of thermo- catalysis, infrared, flaming ionization gas analyzers. Describe a improved scheme of measuring the concentration evaporation of petrol stations in the air by stabilization of the zero indicators gas analyzer of different methods of gas analysis at continuous work. Thus, we achieve zero scale installation without special analyzer of verification gas and reduce additive measurement error and improve the measurement accuracy.

The proposed scheme will perform complex operations on actual measurements of environmental concentration in air of petrol stations and assessment environmental impact according to environmental, sanitary and hygienic norms, fire regulations and safety standards.

Keywords: volume, emission, petrol station, thermo- catalysis, gas analyzer (detector), flaming ionization, infrared, vaporization.

ЗМІСТ

Антоненко Л. П., Хохотва А. П., Заднипрянец Ю. Н., Тимошенко В. В., Демышок Т. И., Дзюбак О. Н. Исследование влияния реконструкции нанопорошка алмаза на адсорбцию ионов меди	3
Соболь О. В., Андреев А. О., Сердюк І. В., Горбань В. Ф., Пінчук Н. В., Мейлехов А. О., Дума Є. О., Бабец Д. М. Вплив тиску робочої атмосфери на формування вакуумно-дугових покриттів ZrN та (Zr-Ti-Ta-Hf-V-Nb)N	9
Скородумова О. Б., Лозовской А. Ю., Тарахно Е. В., Гонтар Т. Б. Исследование механизма гелеобразования в гибридных гелях кремнезема с пониженной склонностью к агрегированию	14
Цыбуля Е. И. Повышение качественных характеристик термоантрацита для производства угольной продукции металлургического назначения	19
Казак И. А. Использование возможностей VBA для уменьшения трудоемкости создания программ	25
Чайковська Є.Є., Молодковець Б. І. Підтримка функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи	31
Бедерак Я. С. Електромагнітна сумісність складноструктурованих електропостачальних систем промислових підприємств	37
Алексеев І. А., Садовой О. В., Трикіло А. І., Бабенко М. В. Прецизійний генератор живлення для комплексів однодротової передачі електричної енергії	46
Волянский Р. С., Садовой А. В. Линеаризация обратными связями уравнений динамики обобщенного электромеханического объекта с дифференциальным уравнением наблюдаемости	52
Кутін В. М., Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. Визначення технічного стану елегазових високовольтних вимикачів в умовах експлуатації	57
Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Малогулко Ю. В. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах	68
Левкін Д. А. Математичні моделі оптимізації параметрів дії лазерного променя на багаточарові біосистеми	77

Иевлева С. Н., Иевлев Е. С. Анализ вероятностных параметров моделей корпоративных компьютерных сетей на основе имитационного моделирования	85
Кузнецов В. В. Проверка адекватности тепловой динамической модели асинхронного двигателя, работающего в сети с некачественной электроэнергией	92
Филоненко Д. В., Райко В. Ф., Шестопапов А. В. Снижение инкрустации дистиллера путем снятия пересыщения по сульфату в реакторе-смесителе отделения дистилляции	102
Нестеренко Е. К., Бойко Т. В., Безносик Ю. А. Математическое моделирование массопереноса гексана в порах силикагеля	110
Кузнецов Ю. Н., Недобой В. А., Хамуйела Ж. А. Герра Экспериментальные исследования высокоскоростного инструментального зажимного патрона	117
Райко В. Ф., Цейтлин М. А. Растворимость отложений гидрокарбоната натрия, образующихся в колоннах карбонизации производства кальцинированной соды	124
Струтинський С. В. Гідростатичний сферичний опорний вузол поворотного стола із струменевим приводом мікропереміщень	130
Цапар В. С. Дослідження впливу періодів переключення пальників на однорідність температурного поля скловарної печі	138
Кулинич Э. М. Оптимальное управление распределением материальных потоков технологической линии производства газобетона	145
Евланов М. В., Васильцова Н. В., Никитюк В. А. Модели операций интеграции функциональных сервисов в информационной системе управления предприятием	151
Андронов В. А., Бухман О. М. Сучасні шляхи зниження рівнів професійної патології у робітників, які підлягають впливу локальної вібрації	167
Івасенко В. М., Приміський В. П. Методи і прилади контролю викидів автозаправних станцій	174
РЕФЕРАТИ	181