

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИКИ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ – 2020

МАТЕРІАЛИ

ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

7–8 квітня 2020 року

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Центральний, 3, м. Миколаїв

Миколаїв • НУК • 2020

УДК 681.5:621.3
ББК 81а73
С 89

ОРГАНІЗАТОРИ:

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Матеріали публікуються за оригіналами, наданими авторами.

Претензії до організаторів не приймаються.

Відповідальний за випуск О. О. Черно

Сучасні проблеми автоматики та електротехніки : матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020. – 50 с.
С 89

У збірнику подані матеріали Всеукраїнської НТК "Сучасні проблеми автоматики та електротехніки".

Розглянуті питання теорії, практики та розвитку електромеханічних систем і пристроїв суднового та загальнопромислового призначення, а також електротехнологічного та інформаційно-вимірювального обладнання.

Збірник може бути корисним для наукових співробітників, викладачів, інженерів та студентів.

УДК 681.5:621.3
ББК 81а73

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2020

СЕКЦІЯ 1. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.314

*Васильєв О.Г., к.т.н., Острогляд В.О., Пищенко А.О., Тростинський М.М.**Національний Університет Кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна*

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ РОБОТОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ

Різання листів і профілів металу на деталі є головною операцією корпусобробного виробництва суднобудування.

Найпоширеніші зараз кисневе й плазмове різання.

В основі методу плазмового різання лежить видування електричної дуги стисненим повітрям з наступним місцевим плавленням металу й видаленням його із зони різання розігрітим газовим потоком.

Тому що температура плазми досягає десятків тисяч градусів, це дозволяє різати будь-які метали і їх сплави. При цьому матеріал не жолобиться й не деформується, а грат, що утворюється на краях різу, легко видаляється, після чого залишається рівна кромка [1].

Ефективність машинобудівних технологічних процесів ґрунтується на подальшому вдосконаленні прогресивних технологій, до яких відноситься плазмове різка металів. В сучасних виробництвах можна підвищити ефективність плазмового різання за рахунок автоматизації керування машиною плазмового різання в складі потокової лінії.

Для вітчизняного ринку верстати розкрою, які пропонуються, – це майбуття, яке, втім, може і зовсім не настати, – для Заходу – ж минушина. Прикладом, в Європі немає жодної металобази, жодного сервісного металоцентру, де не було б такого обладнання. Продається не металопрокат, а вже готова деталь. У нас же машинобудівні заводи, де встановлені машини плазмового або лазерного розкрою металу з ЧПК, можна перерахувати по пальцях. А чимало тих, хто хотів би купити ці машини, не можуть собі цього дозволити.

Підприємства, що експлуатують порталні машини плазмового різання, зустрічаються із проблемою невідповідності якості деталей, що вирізняються, тому що парк устаткування більше не відповідає вимогам сучасного виробництва.

Машини зношені, не задовольняють вимогам по точності й надійності в роботі. При цьому механічна частина машин термічного різання залишається в досить гарному стані, вони зберігають свою цінність для підприємства. Особливо важливе для підприємства плазмове різання металу, адже для нього використовується дороге встаткування [2].

У зв'язку з тим, що багато виробничих підприємств України перебувають у важкій економічній ситуації, на даному ринку утворювався сегмент, пов'язаний з відновленням машин, раніше випущених колективом заводу «Кристал».

У цей час газорізальні машини із числовим програмним керуванням для різання листового прокату типу «Кристал», «Лазурит», «Гранат», що перебувають в експлуатації, фізично й морально застаріли. На цих машинах використовувалися пристрої числового програмного керування (ЧПК) типу 2Р32М і 2Р32Т, лінійно-круговий інтерполятор ЛКИ-1 або РМ-33, виробництва «ЛЭМЗ», у яких для введення програми застосовувалася телеграфна перфорована стрічка з фотозчитувальним пристроєм типу ФСУ-1 або «Консул». Протягом останніх п'ятнадцяти років практично всі модифікації машин не перетерпіли принципових змін і існуюча конструкція машини (система керування приводом, спосіб введення програми) відставала від конструкції порталних машин провідних світових виробників.

Експлуатація машин з максимальним завантаженням через низьку надійність і ремонтпридатність економічно недоцільна. Придбання нової машини сучасних модифікацій закордонних фірм в умовах нестабільної економіки підприємств не завжди можливо. Разом з тим, металокопонування виконавчого механізму машин, що складає основу машин, є вдалою й придатною для експлуатації ще тривалий час. Тому, для зниження вартості різальної машини раціональним вважається шлях її модернізації на базі старої металокопонування виконавчого механізму із застосуванням комплектуючих елементів відомих фірм [3].

Тому досить актуальною є модернізація порталних машин плазмового різання минулих років випуску.

Метою роботи є модернізація системи керування порталної машини плазмового різання Кристал МППлП з метою переоснащення машини на систему керування (ЧПК) на базі сучасного частотного перетворювача та дослідження її динамічних властивостей.

Аналіз сучасного стану й розвитку систем комплексної автоматизації показує, що їх основою є регульований електричний привод, який одержує усе більше широке застосування у всіх сферах життя й діяльності суспільства - від промислового виробництва до сфери побуту.

Завдяки постійному вдосконалюванню технічних показників електроприводів вони у всіх областях застосування є основою сучасного технічного прогресу.

При цьому автоматизація робочих машин, механізмів і технологічних ліній найбільше ефективно досягається при використанні сучасних регульованих електроприводів з мікропроцесорним керуванням.

На світовому ринку перетворювальної техніки відокремилися наступні фірми-лідери: SIMENS, Shneider Electric, Control Technique, ABB, Lenze, які випускають ЕП змінного струму. Кожне нове покоління ПЧ містить все більшу кількість додаткових функцій, як керуючих двигуном, так і таких, що покращують технологічний процес.

З метою модернізації машини плазмового різання застосовується трифазний уніфікований електропривод із цифровим керуванням серії ЕПУ1М призначений для регулювання швидкості двигунів постійного струму в складі комплектних пристроїв у машинобудуванні [4].

Функціональна схема електропривода ЕПУ1М-2П (реверсивний, подачі) наведена на рисунку 1.

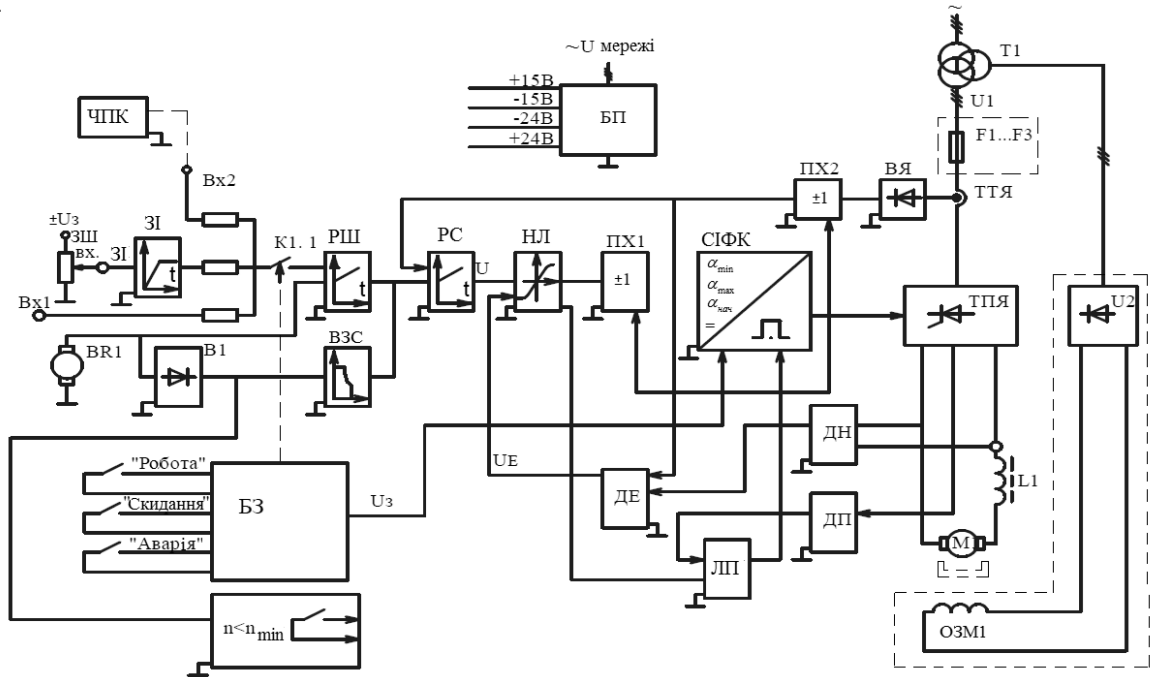


Рисунок 1 - Функціональна схема електропривода ЕПУ1М-2П

ЕПУ1М мають систему імпульсно-фазового керування СІФУ, розширену діагностику, спрощену лінеаризацію в переривчастому режимі й т.п.

Система регулювання електропривода виконана двоконтурною з ПІ-регуляторами швидкості РШ і струму РС із пристроєм лінеаризації характеристик (УЛХ) ТПЯ в режимі переривчастого струму (рпс). УЛХ містить нелінійну ланку НЛ, яка підключається до виходу РС і датчика ЕРС ДЕ. Зв'язок по ЕРС стосовно вихідного сигналу НЛ є позитивним.

На рисунку 2 представлена структурна схема системи керування електропривода.

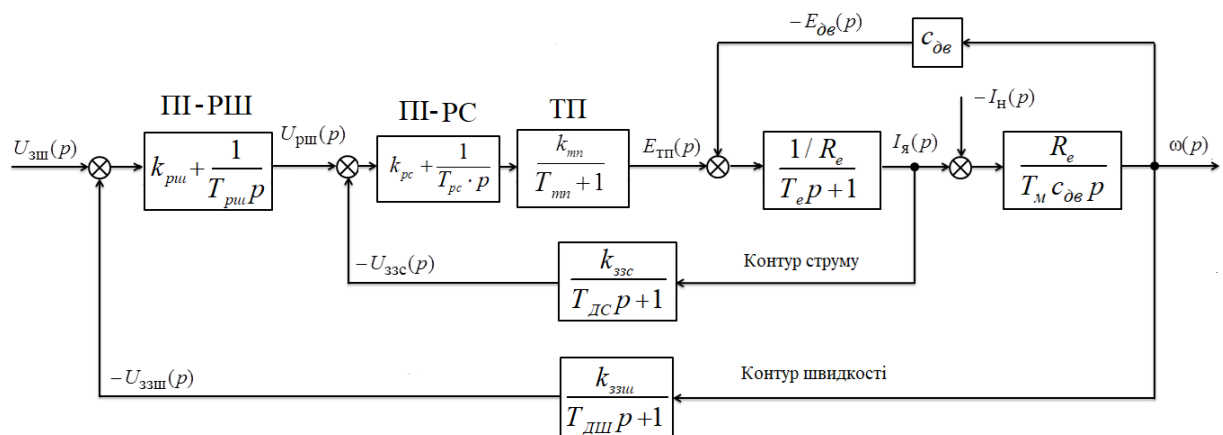


Рисунок 2 - Структурна схема системи керування електропривода

У якості електродвигуна електропривода переміщення порталу машини плазмового різання металу обраний електродвигун серії ПБСТ-33МО, який має наступні характеристики [5]: потужність $P_{\text{ном}} = 1,4$ кВт, частота обертання $n = 1500$ об/хв.

Значення коефіцієнтів структурної схеми обчислюються за методикою, наведеною в [6].

Для дослідження динаміки синтезованої системи керування було створено імітаційну модель у програмі Simulink пакету Matlab.

Результати моделювання наведені на рисунку 3.

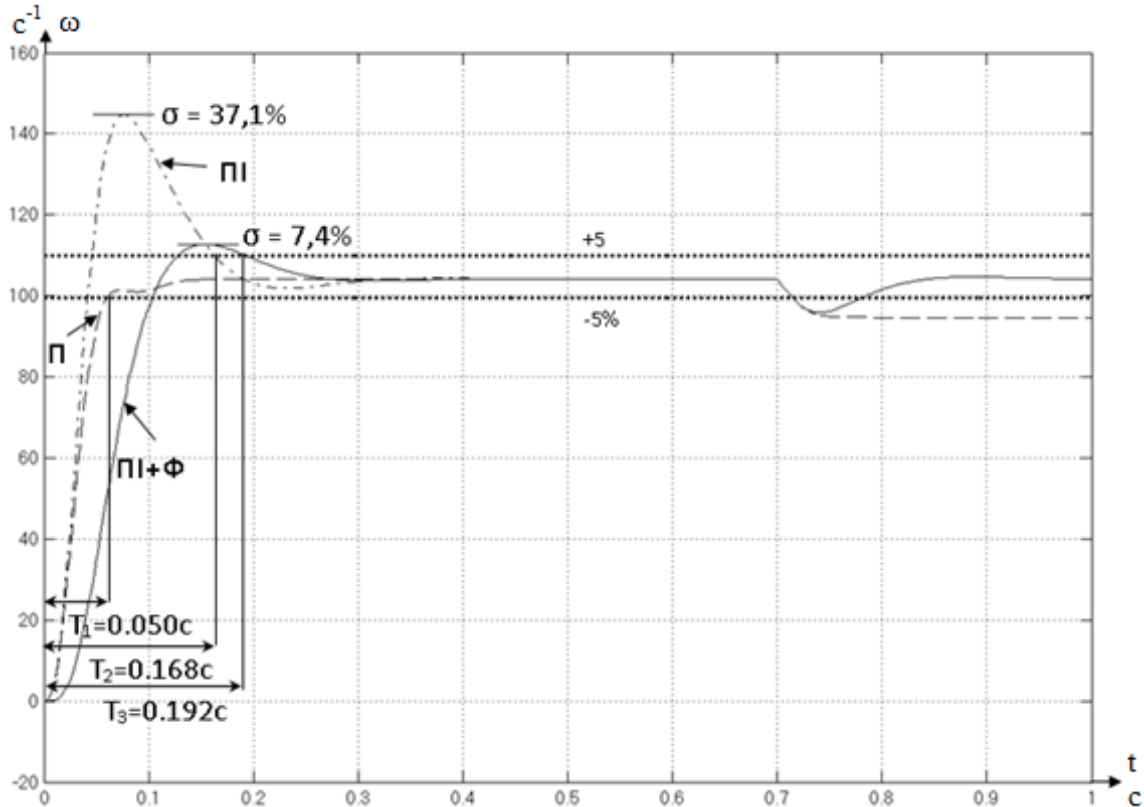


Рисунок 3 - Перехідний процес за швидкістю

З характеристик на рисунку 3 видно, що спроектована система керування здатна відпрацьовувати зміни навантаження при роботі електропривода. При цьому отримані наступні показники якості перехідного процесу: перерегулювання 7,4%, час перехідного процесу 0,19 с.

Висновки.

Запропонована модернізація електропривода переміщення порталу машини плазмового різання металу дозволяє:

- керувати роботою електропривода в програмному режимі;
- забезпечити плавне регулювання швидкості при істотному зниженні енергоспоживання;
- підвищити точність і якість регулювання швидкості;
- зменшити масогабаритні показники системи керування.

Список використаних джерел

1. Павеле Л. А. Получение заготовок автоматизированной термической резкой: учебник / Л. А. Павеле, А. А. Протопопов - Москва; Вологда: Инфра- Инженерия, 2019. - 236 с.: ил., табл.
2. Старий товариш краще? [Електронний ресурс] / <http://varius.com.ua/uk/stariy-tovarish-krashhe-2/>.
3. Задачи совершенствования современного электропривода [Електронний ресурс] / <http://electricalschool.info/elprivod/1238-osobennosti-razvitiya-sovremennogo.html>.
4. Электропривод постоянного тока серии ЭПУ1М. Паспорт.
5. Эффективность применения высокомоментных двигателей в станкостроении / Э. Г. Королев, И. А. Волкомирский, А. М. Лебедев и др. — М.: Машиностроение, 1981. 144 с. ил. — (Электроавтоматика станков).
6. Терехов В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. — 2-е изд. — М.: Академия, 2006. — 304 с.

УДК 681.5

Шарейко Д.Ю., к.т.н, Білюк І.С., к.т.н, Савченко О.В., Фоменко А.М.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

dshareyko.mk@gmail.com, ivanbilyuk@gmail.com, savchenko1984@gmail.com, fomenko.mk@gmail.com

АДАПТИВНИЙ РЕГУЛЯТОР У СУЧАСНИХ КОМПЛЕКТНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

Анотація. Наведено аналіз структур комплектних електроприводів та обґрунтовано доводиться необхідність застосування в них адаптивного регулятора. На підставі проведених розрахунків показано ефективність такого введення та развантаження програмованого логічного контролера, що керує технологічним процесом.

Ключові слова: комплектний електропривод; адаптивний регулятор; програмований логічний контролер; показники якості керування.

Мета і завдання дослідження. На основі існуючих теоретичних досліджень розробити комплектний електропривод з адаптивним принципом керування.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Скласти математичну модель адаптивного регулятора в системі автоматичного керування;
2. Провести теоретичні дослідження, щодо поведінки КЕП з різними законами регулювання.
3. Довести доцільність використання регулятора та впровадити отримані результати в учбовий процес.

Комплектні електроприводи є модульною системою, що свідчить про неможливість її доповнення додатковими елементами, що не входять в структуру електроприводу. Основною складовою частиною перших комплектних електроприводів стали операційні підсилювачі та тиристори, які керуються за допомогою фазового регулювання. Розглянемо комплектацію перших комплектних електроприводів на прикладі електроприводу серії КЕМЕК[1]. Комплектні електроприводи типу КЕМЕК виробництва НРБ призначені для промислових робіт з послідовною роботою координат. Випускаються у варіанті використання їх в приводах подач верстатів з ЧПУ. Всі основні схемотехнічні рішення аналогічні приводам, призначеним для робіт [2]. Функціональна схема приводу наведена на рисунку 1.

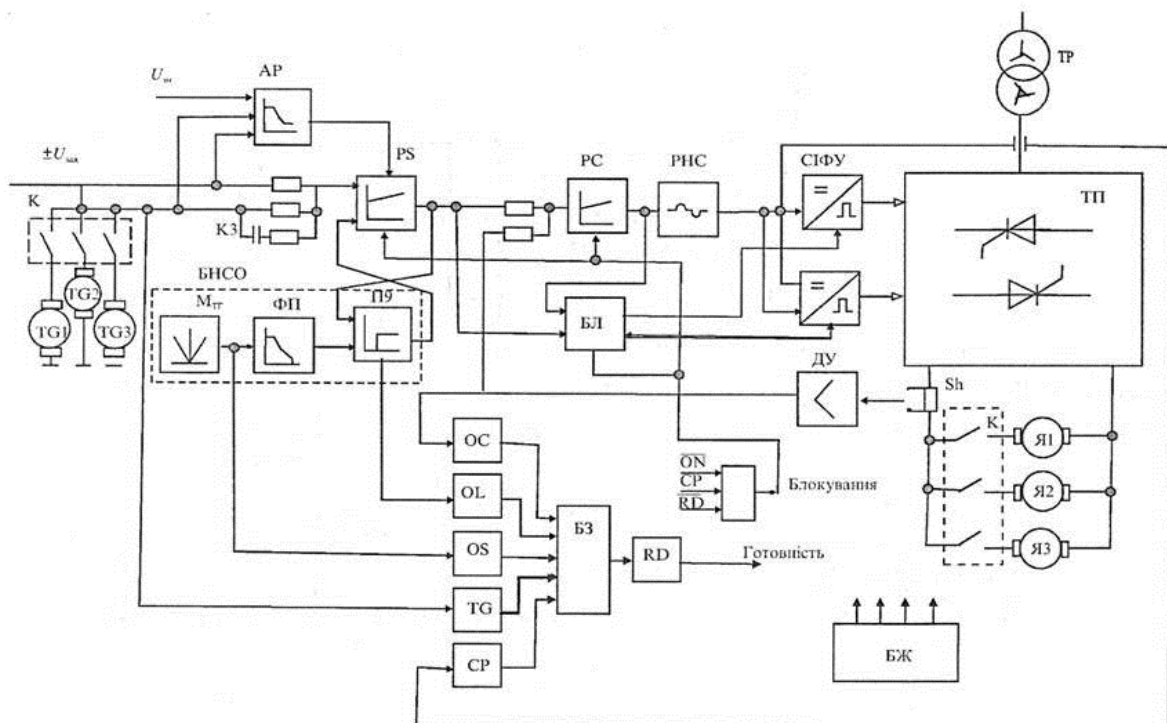


Рис. 1. Функціональна схема приводу КЕМЕК

На схемі позначено: РС - регулятор швидкості; РТ - регулятор струму, АР - адаптивний регулятор, КЗ - коригуюча ланка, МТГ - схема виділення модуля напруги тахогенератора, ФП - функціональний перетворювач, ПЕ - пороговий елемент, БНСО - блок нелінійного струмообмеження, РНТ - регулятор

початкового струму якоря, БЛ - блок логіки роздільного керування, СІФУ - система імпульсно-фазового керування, ТР - силовий трансформатор, Я - двигун, ТГ - тахогенератор, Sh - шунт, УТ - диференційний підсилювач струму, ОС - захист від перевантаження по струму, OL - захист від тривалого перевантаження, OS - захист від перевищення максимальної частоти обертання, TG - захист від обриву ланцюга тахогенератора, CP - захист від неправильного підключення, RD - готовність, ON - сигнал «Робота» (деблокування), БЗ - блок захисту, К - комутатор, БП - блок живлення.

Подальший аналіз аналогових електроприводів показав, що комплектні електроприводи інших серій таких як КЕМТОР, КЕМТОК, Мезоматик та ін. мають у своєму складі адаптивний регулятор, призначений для зміни коефіцієнту підсилення та постійної часу регулятора швидкості.

Можна виділити наступні загальні тенденції розвитку електроприводів, що мають постійний характер:

- постійно розширюється застосування регульованих електроприводів у промисловому обладнанні, транспорті, авіаційній і космічній техніці, медицині, побутовій техніці для досягнення нових якісних результатів в технології;
- заміна нерегульованих електроприводів регульованими в енергозберігаючому обладнанні (насоси, компресори, вентилятори та ін.) з метою енергозбереження;
- поширення блочно-модульних принципів побудови електроприводів, інформаційних засобів, засобів керування і систем керування в цілому;
- динамічна комп'ютеризація електроприводів, механізмів, агрегатів і комплексів та нова ідеологія проектування систем;
- подальший розвиток методів каскадного (підлеглого) керування, що набули поширення в електроприводах.
- активний розвиток і впровадження систем діагностування, обслуговування, візуалізації технологічних процесів і процесів керування.

Багато операцій в електроприводах виконуються засобами керування без участі оператора. Беручи до уваги, що основними засобами керування в сучасних електроприводах є промислові комп'ютери, доречно визначати сучасний комплектний електропривод як комп'ютеризований. Це означення підходить для інтегрованих систем багатодвигуних електроприводів, що об'єднуються з комп'ютерними засобами автоматизації і розгалуженими інформаційними мережами в складі технологічних агрегатів і комплексів.

З урахуванням зазначених вище тенденцій розвитку автоматизованих електроприводів провідні електротехнічні компанії світу здійснюють розробку і продаж електроприводів головної для себе і перспективної для ринку серії з широкими функціональними та структурними можливостями, різними варіантами їх технічної реалізації за умовами застосування для найрізноманітніших машин і механізмів. У головних серіях електроприводів різних корпорацій можна відзначити багато аналогічних ознак. Класифікаційними є ознаки, що характеризують функціональні, конструктивні та енергозберігаючі можливості електроприводів, їх електромагнітну сумісність з технологічним середовищем.

Розглянемо комплектацію сучасного комплектного електроприводу на прикладі електроприводу серії MDC [3-5]. Регулювання швидкості двозонне. У першій зоні (до номінальної швидкості) регулювання здійснюється зміною напруги на якорі при збереженні постійного значення струму збудження. Максимальний момент в цій зоні є постійною величиною. У другій зоні (вище номінальної швидкості) напруга на якорі зберігається постійною і рівною максимальній, а струм збудження зменшується. У цій зоні значення номінальної та максимальної потужностей залишаються постійними величинами. Функціональна схема представлена на рисунку 2.

На рисунку позначено: 1 - Задатчик інтензивності; 2 - Регулятор швидкості; 3 - Вузол формування кривої збудження струмообмеження; 4 - Регулятор струму якоря. Збудження; 5 - Імпульсно-фазове керування; 6 - Кориговальна ланка струму збудження; 7 - Динамічне струмообмеження; 8 - Зворотній зв'язок струму якоря; 9 - Посилення зворотного зв'язку струму якоря; 10 - Посилення сигналу з тахогенератора; 11 - Регулятор струму збудження; 12-Імпульсно-фазове керування збудженням; 13-Зворотній зв'язок струму; 14 - Посилення зворотного зв'язку; 15-Зворотній зв'язок напруги на якорі; 16 - Посилення зворотного зв'язку.

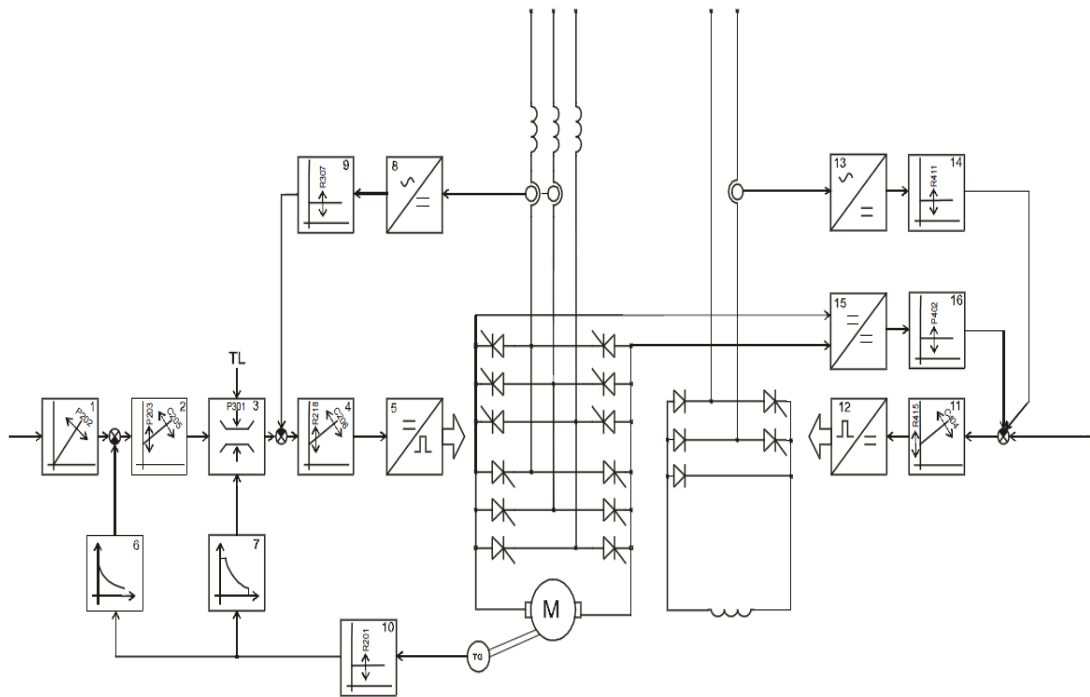


Рис. 2. Функціональна схема комплектного електроприводу серії MDS

Аналіз ринку комплектних електроприводів показує, що інші сучасні комплектні електроприводи такі як, Lenze, CSD, SDC, Siemens та ін.. мають в цілому схожу функціональну схему де основним керуючим пристроєм є програмований контролер або промисловий комп'ютер. Проаналізувавши старі та сучасні комплектні електроприводи було виявлено, що на відміну від перших комплектних електроприводів адаптивний регулятор у сучасних електроприводах, як окремий блок комплектного електроприводу – відсутній. Цілком зрозуміло, що з розвитком цифрової електроніки було вирішено покласти функції такого регулятора на мікроконтролери, тому функції адаптивного регулятора покладені на програмне керування за допомогою програмованого логічного контролера (ПЛК). Основні функції ПЛК - це програмне керування верстатним парком взагалі, а не забезпечення регуляторів. Регулятор знаходиться безпосередньо у структурі КЕП, який реалізовано програмно на основі контролера цього електроприводу. При наявності контролера передбачена можливість програмного керування шляхом задачі параметрів регуляторів з ЧПК. Крім того, в багатодвигунних КЕП можливо встановлення часу зміни параметрів керування при переключенні роботи з одного двигуна на інший. Сходячи з цього можна зробити висновок, що функція АР на сучасних КЕП покладена на ПЛК, але при використанні ПЛК завжди існує можливість його перевантаження, що може суттєво вплинути на роботу електропривода. На основі проведеного аналізу ставиться задача обґрунтувати доцільність застосування у структурі сучасного КЕП адаптивного регулятора, як окремого блоку з метою розвантаження ПЛК електроприводу. Загальна функціональна схема КЕП представлена на рисунку 3.

На рисунку позначено: КЗА - комутаційно-захисна апаратура; ФНТ1, ФНТ2 - силові модулі фільтрації, узгодження напруг та обмеження струмів на вході та виході електронного обладнання; М - електродвигун з датчиком швидкості ДС, або без нього.

Відсутність АР обумовлено тим, що їх функцію взяли на себе програмовані логічні контролери (ПЛК).

В результаті такого підходу логічним стає висновок, що наявність окремо блоку АР в КЕП є недоцільним. Однак останні дослідження [6-12] показують, що наявність АР може розвантажити роботу ПЛК, керуючого всім електроприводом. Сучасні АР можуть зробити систему керування, в яку входять, більш робастною [2]. За допомогою програмного продукту Matlab було проведено моделювання системи стабілізації швидкості двигуна постійного струму з використанням стандартного ПІД-регулятора і принципово нового АР, заснованого на методі аналітичного конструювання [1, 2]. Структурні моделі системи з ПІД- регулятором представлена на рисунку 4 [2].

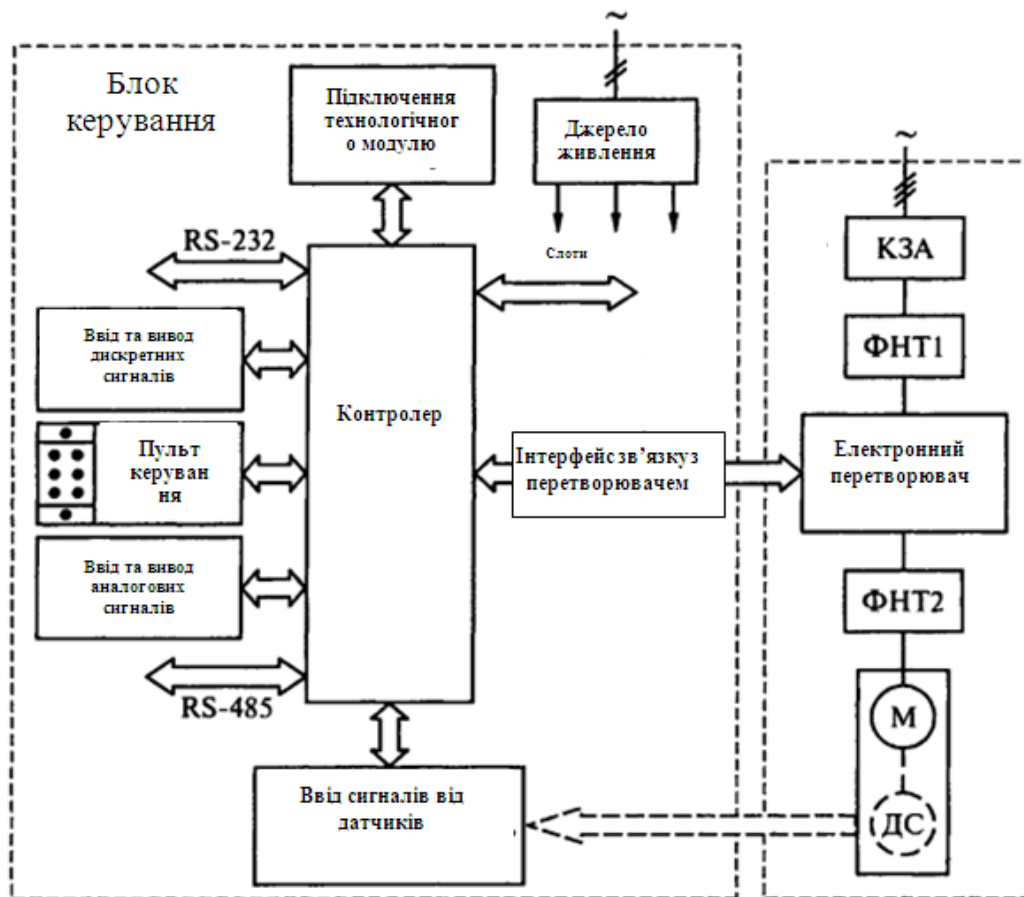


Рис. 3. Функціональна схема КЕП

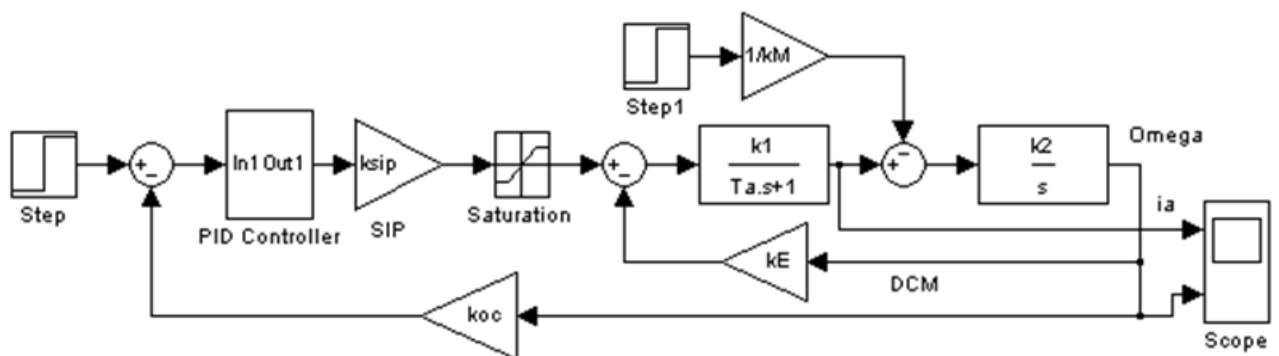


Рис. 4. Структурна модель стабілізації швидкості ДПТ

До складу структурної моделі входять наступні блоки-субмоделі: PID-controller - ПІД-регулятор, SIP - широтно-імпульсний перетворювач з обмеженням по виходу, призначений для управління струмом якорного ланцюга, DCM - ДПТ з незалежним збудженням.

Підставивши в схему значення, запропоновані в [11] були отримані перехідні характеристики, що наведені на рисунку 5..

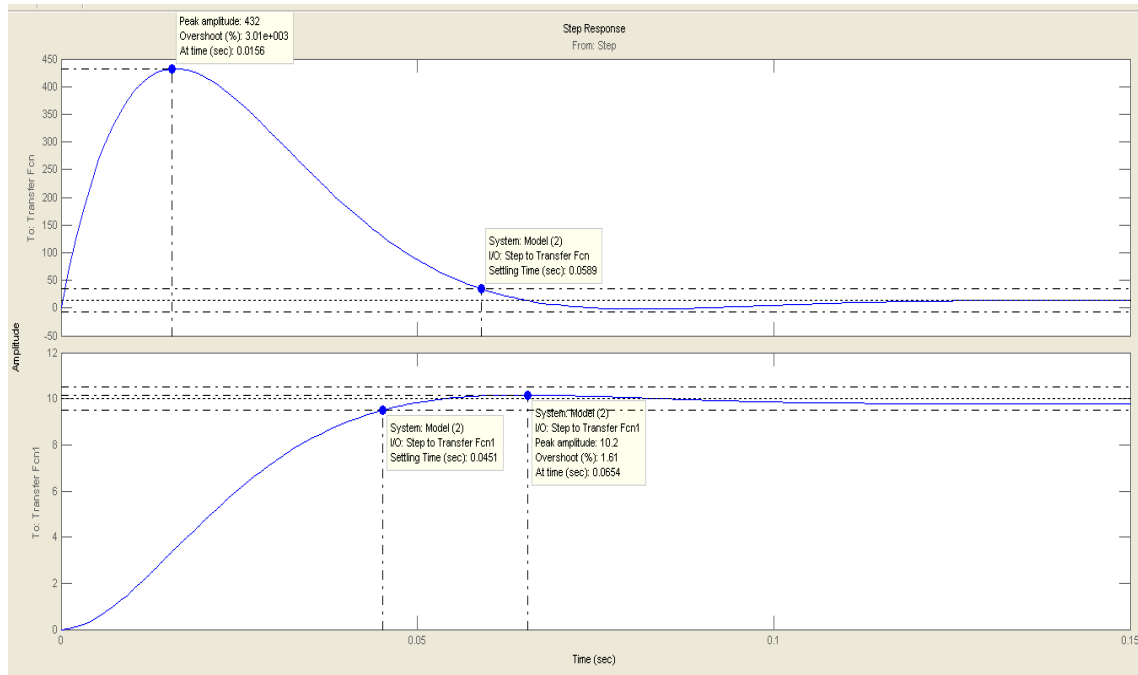


Рис. 5. Перехідні характеристики системи з ПІД-регулятором

Крива зверху відображає скачок струму якоря, знизу-кутову швидкість. Далі була проведена заміна ПІД-регулятора на АР, структурна схема якого представлена на рисунку 6.

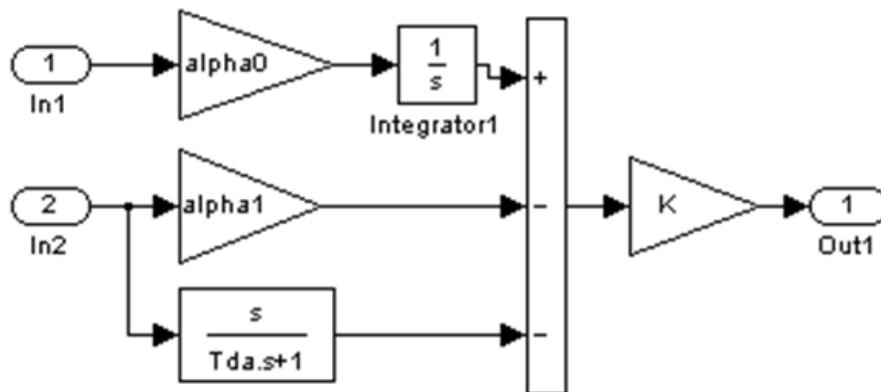


Рис. 6. Структурна схема адаптивного регулятора

Задаючись параметрами, запропонованими в [2] були отримані перехідні характеристики, що наведені на рисунку 7.

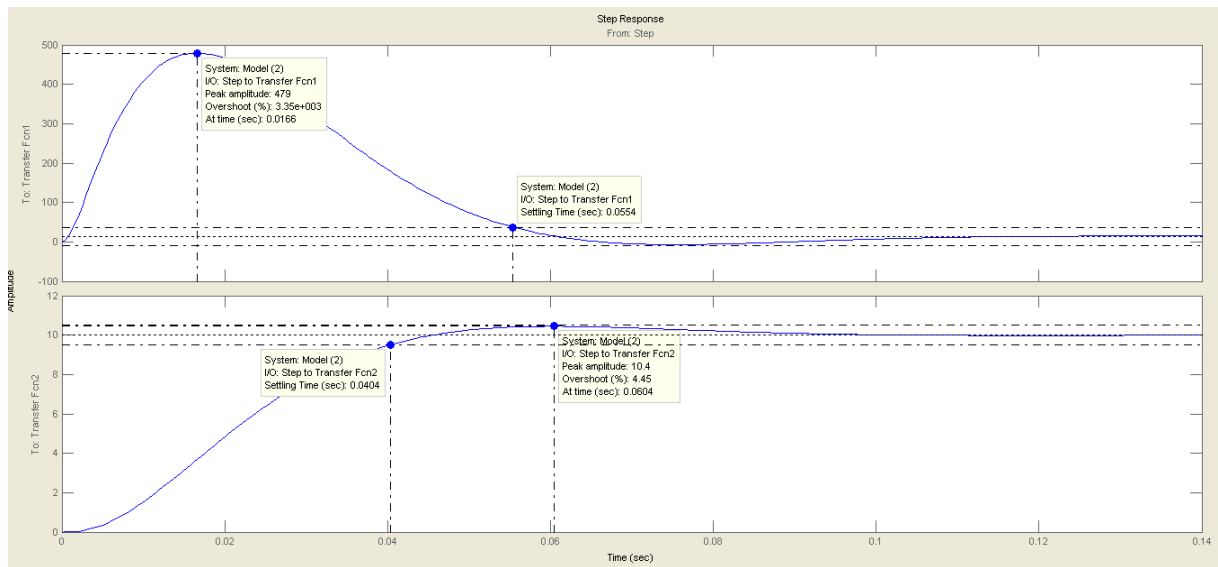


Рис. 7. Перехідні характеристики системи з АР

Висновок. В обох випадках перерегулювання не перевищує 5% і час перехідного процесу - менше 0,06 с. Однак, в системі з АР відсутня статична помилка, що підтверджує наявність властивості робастності.

Результати проведених досліджень системи керування комплексного електропривода з адаптивним регулятором впроваджені в учбовий процес кафедри автоматики Національного університету кораблебудування.

Список літератури

1. Чернов Е.А. Комплектные электроприводы станков с ЧПУ. Справочное пособие Горький. Волго-Вятское из-во, 1989, 320с.
2. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Н. Л. Рассудов; учебник для студ. высш. учеб. заведений. – 3-е изд., испр. – М. : Издательский центр "Академия", 2007. – 576 с.
3. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.; Питер, 2008. – 288 с.: ил.
4. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB6.0 / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320с.
5. Hairer, Ernst; Nørsett, Syvert Paul; Wanner, Gerhard (2008), Solving ordinary differential equations I: Nonstiff problems, Berlin, New York: Springer-Verlag.
6. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
7. Краснодубец Л. А. Аналитическое конструирование адаптивных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации / Л. А. Краснодубец // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 108 — С. 5-9.
8. Применение новых адаптивных регуляторов в системах стабилизации скорости двигателей постоянного тока Л. А. Краснодубец // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. — Вып. 108 — С. 213-217.
9. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.
10. Krzysztof Szabat and Teresa Orłowska-Kowalska. Adaptive control of the electrical drivers with the elastic coupling using Kalman filter. // Wroclaw University of Technology. Poland. 2009 372 pages.
11. Хлыпало Е.И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах Энергия, 1973 341с.
12. Нелінійні адаптивні регулятори в комплектних електроприводах / Партола Є.О., Савченко О.В., Гараєв К. Р., Фоменко Л. А // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених «Автоматика та електротехніка». –Миколаїв: НУК, 2019. – С. 62–64.

УДК 621.313.84:621.318.3:621.867.522

Іванов А.В.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИМИ ТРАНСПОРТУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ

В сучасному світі використання вібраційних технологій вийшло на новий, порівняно з минулим, високий рівень розвитку [1]. Вібраційні технології знайшли широке застосування в різних галузях промисловості, серед яких транспортування та дозування різних видів матеріалів, орієнтування деталей, ущільнення сумішей та багато інших.

Все ж таки одним із найбільших застосувань є вібраційне транспортування за допомогою електромагнітного вібраційного привода, що представляє собою вібраційні конвеєри або транспортери. Застосування такого виду конвеєра дає змогу транспортувати сипкі суміші, такі як зернові культури, або більш твердих і об'ємних матеріалів різних фракцій, наприклад залізна руда, вугілля та інші. Застосування в даній сфері електромагнітних вібраційних приводів дає низку переваг у порівнянні з іншими приводами, а саме [1-3]:

- простота регулювання амплітудою коливань робочого органу;
- простота отримання прямолінійних коливань;
- низький рівень шуму;
- простота синхронізації вібраторів;
- висока енергетична ефективність при роботі в режимах, близьких до резонансного;
- можливість роботи з абразивними, гарячими та хімічно активними речовинами;
- можливість суміщення процесу транспортування з просушкою, віянням та іншими технологічними процесами;
- висока надійність та довговічність завдяки відсутності рухомих механічних з'єднань.

Сучасні вібраційні транспортуючі пристрої представляють собою подальший розвиток хитних конвеєрів, що характеризується зворотно-поступальним рухом робочого органу та переміщенням вантажу під дією сил інерції. Вібраційні конвеєри використовуються переважно для транспортування сипких матеріалів, таких як зерно, або твердих матеріалів різних фракцій, таких як руда, вугілля і т. ін. Перевагами вібраційного методу транспортування є відсутність зношення вантажонесучого органа, можливість роботи з абразивними, гарячими та хімічно активними речовинами, можливість суміщення процесу транспортування з просушкою, віянням та іншими технологічними операціями [4].

Метою роботи є аналіз математичних моделей вібраційних транспортуючих пристроїв з електромагнітним приводом для дослідження їх енергетичних характеристик та удосконалення методів керування.

У вібраційних живильниках та інших пристроях, що потребують регулювання параметрів вібрації, зазвичай використовується керований за амплітудою електромагнітний привод, що працює в дорезонансному режимі, який є не енергоефективним, але забезпечує простоту керування [?]. Відомо, що найбільший ККД вібраційного привода досягається на частотах, близьких до резонансної. Але більшість вібротехнологічних процесів характеризуються зміною інерційних властивостей оброблюваного матеріалу, що призводить до флуктуації резонансної частоти, а також зміною його дисипативних властивостей, що викликає нестабільність амплітуди резонансних коливань [5].

Робота на частотах, близьких до резонансної, забезпечує найбільшу енергетичну ефективність, але при цьому на процеси керування можуть впливати механічні властивості робочого середовища та хвильові процеси в конструкції пристроїв, що потрібно враховувати при моделюванні.

В роботах [6, 7] досліджено керовані резонансні вібраційні пристрої. Математична модель привода вібраційного конвеєра [6] представлена рівняннями:

$$\ddot{p} + 2\zeta\omega_0\dot{p} + \omega_0^2(p - p_0) = K_p\omega_0^2 f_c; \quad (1)$$

$$L(p) \cdot \frac{di_c}{dt} + \left(\frac{\partial L(p)}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} + R_c \right) \cdot i_c = u; \quad (2)$$

$$f_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L(p)}{\partial p} \cdot i_c^2; \quad L(p) = L_0 \cdot \frac{P_0}{d+p}; \quad (3,4)$$

$$\ddot{x} + \mu_F \dot{x} = \omega^2 P_a \sin \omega t - \mu_S \operatorname{sgn}(x) g; \quad (5)$$

$$P_a = P[1 + \mu_S \operatorname{sgn}(x) t g \alpha]; \quad \dot{x}_i = \varepsilon_i \dot{x}(t_i); \quad \dot{y}_i = -\varepsilon_i \dot{y}(t_i); \quad (6,7,8)$$

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= m\omega^2 P \sin \omega t \\ m\ddot{y} &= m\omega^2 P \varepsilon g \alpha \sin \omega t - mg \end{aligned} \quad (9)$$

$$M_1 = Q_1 \cdot T; \quad v_1 = \frac{Q_1}{S \cdot \rho}; \quad (10,11)$$

$$Q_2 = \frac{a \cdot p}{T} \cdot \int_0^T h(t) \cdot v(t) \cdot dt; \quad (12)$$

$$h(t) = \begin{cases} H, & \text{for } v(t) \leq v_{cr} \\ \frac{M_1}{a \cdot p \cdot \int_0^T v(t) \cdot dt}, & \text{for } v(t) > v_{cr} \end{cases} \quad (13)$$

де p , ζ , ω_0 , p_0 , K_p і f_c – вимірне переміщення, коефіцієнт демпфування, резонансна частота, рівновага положення жолоба, статичне посилення і сила відповідно. Механічна сила f_c виробляється електромагнітом. R_c являє собою активний опір, $L(p)$ – індуктивність котушки. Величини i_c , u та L_0 являють собою струм, напругу та індуктивність котушки. μ і μ_F позначають динамічні коефіцієнти тертя для твердих і в'язких сил тертя відповідно. Підпис i відображає відповідні значення прямо при ударі. Коефіцієнти відновлення ε_t та ε_n можуть приймати довільні значення від 0 до 1. З метою моделювання руху матеріалу від впускного бункера до вібраційного жолоба використовували такі символи: Q_1 – потік матеріалу з впускного бункера, відрегульований за допомогою затвору; $v(t)$ – швидкість сипучого матеріалу через вібросито; a – ширина жолоба; $h(t)$ – рівень висоти матеріалу в жолобі безпосередньо внизу затвору; H – максимальний рівень висоти матеріалу в жолобі безпосередньо під затвором; ρ – щільність сипучого матеріалу; T – період механічних коливань; S – площа поперечного перерізу затвора. v_{cr} являє собою мінімальне значення $v(t)$, для якого умова $Q_2 = Q_1$ виконується.

В роботі [7] використовується модель узагальненої вібраційної установки:

$$\delta(t) = \delta_0 + x_1(t) - x_0(t); \quad (14)$$

$$I_1^*(t) = \frac{I_{M1}}{R_{1CL} \cdot h(t)} (U(t) - RI(t)); \quad (15)$$

$$I_2^*(t) = \frac{1}{R_B} (U(t) - RI(t)); \quad (16)$$

$$d\Phi/dt = W^{-1} \{ U(t) - R \cdot [W^{-1} I W_{\text{сх}}(\Phi(t), \delta(t)) + I_1^*(t) + I_2^*(t)] \}; \quad (17)$$

$$\begin{cases} M_{0,0}(p)x_0(p) + M_{0,1}(p)x_1(p) + M_{0,2}(p)x_2(p) + \dots + M_{0,n-1}(p)x_{n-1}(p) = F(IW_{\text{сх}}(p), \delta(p)); \\ M_{1,0}(p)x_0(p) + M_{1,1}(p)x_1(p) + M_{1,2}(p)x_2(p) + \dots + M_{1,n-1}(p)x_{n-1}(p) = -F(IW_{\text{сх}}(p), \delta(p)); \\ M_{2,0}(p)x_0(p) + M_{2,1}(p)x_1(p) + M_{2,2}(p)x_2(p) + \dots + M_{2,n-1}(p)x_{n-1}(p) = 0; \\ \vdots \\ M_{n-1,0}(p)x_0(p) + M_{n-1,1}(p)x_1(p) + M_{n-1,2}(p)x_2(p) + \dots + M_{n-1,n-1}(p)x_{n-1}(p) = 0. \end{cases} \quad (18)$$

де x_0 , x_1 , x_2 – координати переміщення робочого органу, проміжної платформи і динамічного віброгасника відповідно, δ – величина повітряного зазору; δ_0 – величина повітряного зазору в положенні рівноваги, I_e – МРС, створювана вихровими струмами, I_e – МРС, якою обумовлена реактивна складова намагніченості, R_e – еквівалентний опір контурів замикання вихрових струмів, R_e – фіктивний опір, що характеризує втрати на гістерезис.

Як видно з наведених рівнянь, в моделях [6, 7] не враховано хвильові процеси. Це пояснюється тим, що розміри пристроїв, що розглядаються, є значно меншими за довжину хвилі. При проектуванні габаритних резонансних віброустановок хвильові процеси потрібно враховувати, оскільки вони можуть значною мірою вплинути на процеси керування амплітудою та частотою вібрації.

В роботі [8] досліджено енергетичні характеристики електромагнітного вібраційного привода. Встановлено, що при автоматичному керуванні ККД електромагнітного вібраційного привода досягає 80%, що є значно вищим у порівнянні з відцентровим. Визначено оптимальну частоту, що забезпечує максимум ККД, яка становить 0,95..0,999 від резонансної і визначається в залежності від навантаження. При цьому дослідження проводились тільки для синусоїдальної форми напруги на обмотці вібратора. В роботі [9] досліджено систему керування, що живить обмотку електромагнітного вібратора напругою прямокутної форми, яка забезпечує більш високий ККД, у порівнянні з синусоїдальною. Але досліджень енергетичних характеристик електромагнітного привода з прямокутною формою напруги живлення проведено не було.

В роботі [10] запропоновано метод керування частотою за різницею фаз між третьою та першою гармоніками струму. Він дозволяє при мінімальній кількості датчиків забезпечити стійкий білярезонансний режим роботи вібраційної установки в умовах зміни маси оброблюваного матеріалу і тим самим досягти її максимальної енергетичної ефективності. Але можливість застосування цього методу при прямокутній формі напруги на сьогоднішній день не досліджено.

Висновки. Існуючі математичні моделі систем керування вібраційними транспортуючими пристроями не враховують хвильових процесів деформації вантажонесучого органу, які можуть впливати на динаміку процесів керування.

Не досліджено енергетичні характеристики електромагнітних вібраційних приводів при живленні обмоток вібраторів напругою прямокутної форми.

Не досліджено керування частотою вібраційних приводів за різницею фаз між гармонічними складовими струму при живленні напругою прямокутної форми.

Для підвищення ефективності систем керування електромагнітними приводами транспортуючих пристроїв необхідно удосконалити математичну модель шляхом урахування хвильових процесів, дослідити енергетичні характеристики і можливість керування частотою за різницею фаз між гармонічними складовими струму при живленні обмотки вібратора напругою прямокутної форми.

Список літератури

1. Ланець О.С. (2008). Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка".
2. Neyman L., Neyman V., Shabanov A. (2017). Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier. *Proceedings of 18-th International Conference on Micro/nanotechnologies and Electron Devices EDM*. P. 503 – 506.
3. Повідайло В.О., Гаврильченко О.В., Ланець О.С. (2000). Статичний розрахунок електромагнітних віброзбудників вібраційних машин за допомогою EOM. *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository*. <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/11225/1/01.pdf>.
4. Проць Я.І., Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Ляшук О.Л. (2011). Автоматизація виробничих процесів: Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 344 с.
5. Черно А.А. (2014). Управление резонансным электромагнитным вибрационным приводом с использованием алгоритма цифровой фильтрации на основе дискретного преобразования Фурье. *Международный научно-технический журнал "Проблемы управления и информатики"*. №4. С. 111 – 125.
6. Misljen P.J., Despotovic Z.V., Matijevic M.S. (2016). Modeling and control of bulk material flow on the electromagnetic vibratory feeder. *Automatika*. №4 (57). P. 936 – 947.
7. Черно А. А. (2014). Динамическая модель электромагнитного вибрационного привода. *Технічна електродинаміка*. № 2. С. 37-43.
Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2014_2_8
8. Cherny O.O., Monchenko M. Yu. (2016). Energy efficiency of the vibratory device electromagnetic drive system. *Технічна електродинаміка*. №1. С. 20 – 25.
9. Sinik V., Despotovic Z., (2012). Palinkas I. Power Current Control of a Resonant Vibratory Conveyor Having Electromagnetic Drive. №12. С. 677-688.
10. Cherny A.A. (2017). Control of electromagnetic vibratory drive using a phase difference between current harmonics. *Journal of Automation and Information Sciences*. Vol. 49. Iss. 7. PP. 58–76.

УДК168.5

Козлов А.Ю.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКОЯКІСНИХ БЕТОННИХ ВИРОБІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИВОДІВ ТА ЕЛЕМЕНТІВ З РЕГУЛЬОВАНОЮ ЖОРСТКІСТЮ

Для виробництва високоякісних бетонних виробів застосовують технологію послідовного вібрування на різних частотах. Застосування різночастотних режимів вібрації дозволяє поліпшити упаковку різного по крупності заповнювача. Для кожної бетонної суміші при прийнятих параметрах коливань є оптимальна тривалість вібрування [1]. При недостатній його тривалості спостерігається недоущільнення бетону і зниження його міцності; занадто тривале вібрування не дає помітного підвищення щільності і міцності бетону і може викликати розшарування пластичних сумішей. Зазвичай рекомендується тривалість вібрування приймати вдвічі біль-

шою показника жорсткості бетонної суміші, визначеної на стандартному лабораторному майданчику [2]. Отже, для збільшення якості формування бетонних виробів необхідно здійснювати вібраційне ущільнення на різних частотах. Для виконання даного процесу доцільно використовувати вібраційну установку з електромагнітним приводом. Він має низку переваг [3, 4]: висока енергетична ефективність при роботі в режимах, близьких до резонансного, відсутність проблеми проходження резонансу під час пуску та зупинки, висока надійність та довговічність завдяки відсутності рухомих механічних з'єднань, низький рівень шуму. Для ефективності використання електромагнітного привода необхідно забезпечити його роботу в білярезонансному режимі, а для того щоб забезпечувати такий режим на різних частотах, необхідно використовувати елементи з регульованою жорсткістю, до яких належать керовані динамічні віброгасники, що встановлюються на проміжну масу установок [5]. Тому актуальною задачею є розробка систем автоматичного керування вібраційними обладнаннями з електромагнітним приводом та пристроями з регульованою жорсткістю.

Метою роботи є аналіз існуючих систем керування вібраційним обладнанням з електромагнітним приводом та пристроями з регульованою жорсткістю і визначення напрямів їх дослідження та удосконалення.

В електромагнітному віброгаснику магнітним полем створюється додаткова жорсткість [6, 7]. Тобто, є два полюси які зміщуються, магнітне поле намагається встановити полюси один навпроти одного, і таким чином магнітне поле працює як пружина. Чим більша буде сила струму тим більша електромагнітна жорсткість. В роботі [8] запропонована структура системи автоматичного керування вібраційної установкою з електромагнітним приводом і електромагнітним динамічним віброгасником, встановленим на проміжній платформі (рис. 1). На схемі прийнято наступні позначення: РВ - робочий орган віброустановки; ПП - проміжна платформа; КДВГ - керований динамічний віброгасник; ЕМВ - електромагнітний вібратор; А - акселерометр; ДТ - датчик струму; АЦП - аналого-цифровий перетворювач; ФОС - формувач опорних сигналів; ДПФ - блок дискретного перетворення Фур'є; РА - регулятор амплітуди; ГС - генератор синусоїди; РФ - регулятор фази; ШІМ - широтно-імпульсний модулятор; ПЧ - перетворювач частоти; ТП - транзисторний перетворювач постійної напруги, X_{pr} – приписане значення амплітуди, ε_x – неузгодженість амплітуд, U_1 – амплітуда, u_1 – напруга на обмотці вібратора, $\sim u_m$ – мережева напруга, X – амплітуда коливань робочого органу, ω – частота, ω_1 – частота струму в обмотці, a – прискорення робочого органу, I_1 – сила струму в обмотці вібратора, φ – фаза, φ_{pr} – різниця фаз, ε_φ – неузгодженість фаз, u_2 – напруга на обмотці віброгасника.

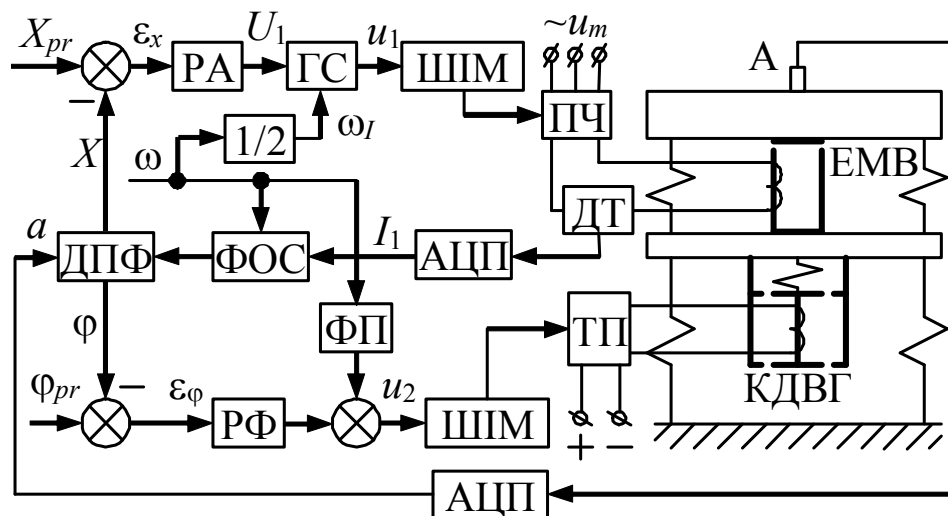


Рис. 1. Функціональна схема системи керування

Дана система забезпечує задану амплітуду і частоту вібрації робочого органу установки шляхом керування амплітудою і частотою струму в обмотці електромагнітного вібратора. При цьому вона підтримує стійкий резонансний режим коливань шляхом керування жорсткістю підвісу віброгасника з метою забезпечення максимального ККД. Керування амплітудою коливань і резонансною частотою установки здійснюється за принципом зворотного зв'язку з використанням цифрових пропорційно-інтегральних регуляторів. Визначення амплітуди і фази коливань робочого органу здійснюється в процесі керування шляхом виконання процедури дискретного перетворення Фур'є над сигналом з датчика вібрації.

Електромагнітні динамічні віброгасники мають свої недоліки. Якщо їх використовувати в великогабаритних пристроях, це призведе до великих втрат енергії, оскільки для переходу на більш високу частоту необхідно використовувати велику силу струму, і під час процесу ущільнення бетону на високій частоті віброгасник буде споживати велику кількість енергії.

Даних недоліків позбавлені керовані динамічні віброгасники з нелінійними пружними елементами [9]. Перевагою віброгасника з нелінійними пружними елементами, у порівнянні з електромагнітним, є можливість

використання великих віброгасних мас та великих амплітуд коливань для створення великої сили реакції при малому енергоспоживанні, низькій матеріалоемності та широкому діапазоні регулювання частоти настройки. Для такого віброгасника, як і для електромагнітного, може бути застосований принцип фазової автопідстройки частоти. Але як об'єкт керування віброгасник із нелінійними пружними елементами принципово відрізняється від електромагнітного віброгасника.

В роботі [10] представлена структура системи автоматичного керування динамічним віброгасником з нелінійними пружними елементами (рис. 2). На схемі прийнято наступні позначення: УП – узгоджуючий підсилювач; К – компаратор; ФД – фазовий дискримінатор; ЦР – цифровий регулятор; ШІМ – широтно-імпульсний модулятор; ТП – транзисторний перетворювач; ДПС – двигун постійного струму; Р – редуктор; МП – механізм переміщення; КДВГ – керований динамічний віброгасник; ОЗ – об'єкт захисту; Д – датчик вібрації; МЕОМ – мікроконтроллер.

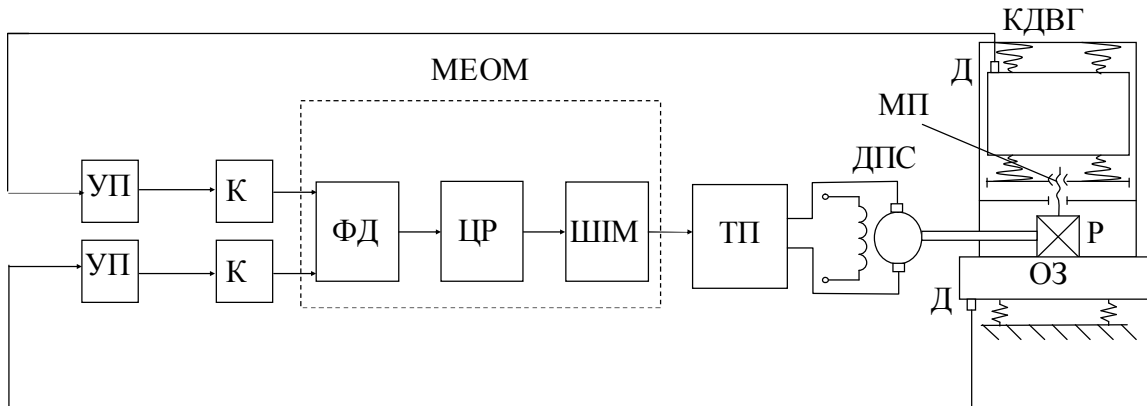


Рис. 2. Функціональна схема системи керування керованим динамічним віброгасником

Керування частотою настройки здійснюється шляхом регулювання динамічної жорсткості пружного підвісу віброгасної маси за рахунок зміни статичної деформації нелінійних пружних елементів. При вібрації об'єкта захисту віброгасна маса здійснює коливання. За допомогою керованого привода рухома балка переміщується уздовж осі коливань, внаслідок чого здійснюється регулювання статичної деформації нелінійних пружних елементів таким чином, що власна частота підвісу віброгасної маси співпадає з частотою вимушених коливань. В результаті віброгасна маса входить в резонанс і створює динамічну силу реакції, яка через нелінійні пружні елементи діє на об'єкт захисту, знижуючи його вібрацію. Коливання віброгасної маси в напрямках, перпендикулярних коливанням об'єкта захисту, обмежуються центруючими пружними елементами. Як нелінійні пружні елементи доцільно використовувати конічні пружини.

Таким чином, в роботі [10] розглянуто керування віброгасником з конічними пружинами як окремим пристроєм. Але на сьогоднішній день не досліджено процеси сумісного керування таким віброгасником і електромагнітним приводом.

Висновки. Для якісних бетонних виробів необхідне вібраційне ущільнення на різних частотах. Електромагнітні приводи мають більш високий робочий ресурс, забезпечують незалежне керування частотою та амплітудою і мають найбільший ККД при роботі в білярезонансному режимі. Збереження білярезонансного режиму при зміні частоти вібрації у певному діапазоні забезпечується резонаторами з регульованою жорсткістю якими можуть бути керовані динамічні віброгасники, що встановлюються на проміжній платформі віброустановки. Віброгасники з конічними пружинами мають ряд переваг у порівнянні з електромагнітним. На сьогоднішній день не досліджено процеси сумісного керування електромагнітними вібраторами та керованими віброгасниками з конічними пружинами що є перспективною задачею для подальших досліджень.

Список літератури

1. Баженов Ю.М. Технология бетона: Учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1987. 415 с.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Достижение необходимых свойств через уплотнение бетонной смеси. Ел. ресурс. Режим доступу: <https://m350.ru/articles/more/v/id/92/>
3. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2008. – 324 с
4. Ланець О.С. Розвиток міжрезонансних машин з електромагнітним приводом. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2008. Вип. 42. С. 3 – 18
5. Гуров А.П., Черно А.А. Резонансные вибрационные машины с системой управляемой виброзащиты. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2007. №1. С. 43 – 44.

6. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. - Т.6. Защита от вибрации и ударов // Под ред. К.В. Фролова -М.: Машиностроение, 1981. - 456 с.
7. Гуров А.П., Черно А.А., Васильев А.Г. Пути повышения амплитуды колебаний электромагнитных управляемых динамических виброгасителей. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2007. Вип 3, ч. 1. С. 33 – 34.
8. Автоматическое управление резонансной вибрационной установкой с электромагнитным динамическим виброгасителем / А. А. Черно, А. П. Гуров. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2014. Вип. 4. С. 18–27.
9. Гуров А.П., Черно А.А. Управляемый динамический виброгаситель с нелинейными упругими элементами. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2007. Вип 6, ч. 2. С. 10 – 11.
10. Черно О.О., Крутякова О.О. Синтез цифрового регулятора системы автоматического управления динамическим виброгасителем с нелинейными пружными элементами // *Зб. наук. праць НУК*. – Миколаїв: НУК, 2010. – №2 – С. 104 – 111.

УДК 621.3

Стаканов Д.К.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИВОДІВ НА ВІБРАЦІЙНИХ СЕПАРАТОРАХ

Сільське господарство є значною частиною економіки багатьох держав. А вирощування зернових культур є важливою частиною економіки України впродовж багатьох років. Виробництво зерна носить сезонний характер, а споживання похідних від нього продуктів для тваринного корму та людського живлення – безперервне, тому вміння зберігати зерно від урожаю до урожаю – життєво важлива задача людини [6].

Бажання зменшити втрати при збиранні та обробці зерна, збільшити можливий час для транспортування та зберігання (потрібно чисте і механічно не пошкоджене зерно) та впроваджувати більший контроль якості для зерна приводить до розвитку спеціалізованих технологій для всієї технологічної лінії.

Попереднє очищення зерна в зернових сепараторах є однією з найважливіших технологічних операцій для його післязбиральної обробки в системі підготовки зерна до зберігання [10]. Окремі домішки у партіях зерна мають більш високу вологість (в 1,5 рази більшу), ніж саме зерно, також їх часто вражають мікроорганізми. Це призводить до більш швидкого зігрівання забруднених партій зерна і, як наслідок, зростанню його втрат. Тому, розробка нових технологій, що забезпечують підвищення якості сепарації зерна, є актуальною задачею.

Метою роботи є аналіз сучасних технологій сепарації зерна та можливих перспектив у їх удосконаленні.

Загальний вигляд технології виробництва, зберігання і обробки зерна наведений на рис. 1. Одним з ключових етапів є саме очистка зерна.



Рисунок 1 – Блок-схема технології виробництва, зберігання і обробки зерна.

Наразі основу зерноочисних агрегатів складають повітряно-решітні сепаратори. У порівнянні із повітряними системами і трієрними блоками вони працюють при мінімальних витратах енергії [4, 8]. Повітряно-решітні зернові сепаратори розподіляють зернову суміш за двома ознаками - розмірами (ширині і товщині) і швидкості витання компонентів. Поєднання в одній машині решітного і пневмосепаратора покращує ефективність очищення, дає можливість використовувати один механізм розподілу зернового потоку по ширині сепаруючих органів машини - пневмоканалів і решіт [2, 7].

Віброрешітні сепаратори традиційної схеми розділення зерноsumішей решетами практично досягли межі вдосконалення і подальше підвищення продуктивності реалізується збільшенням робочої площі решіт.

Збільшення габаритних розмірів - довжини і ширини решета підвищує продуктивність зерноочисної машини, але супроводжується збільшенням габаритів машини, підвищенням металоємності, ускладнюється очищення решіт і вирівнювання (по ширині) поля швидкостей повітря, знижуються економічні показники [5]. Перспективним напрямком подальшого підвищення продуктивності, при нормованій якості очищення зерна, є також інтенсифікація розпушування зернового шару гальмуючими елементами-розпушувачами, при збільшенні питомого навантаження на решето [9].

Одним із способів інтенсифікації процесу сепарації зерна є використання додаткового силового поля при вібраційному і обертальному рухах робочих органів. Такий спосіб використовується в зернових сепараторах вібраційного типу А1-БЦСМ-100 і Р8-БЦСМ-50 [10]. Недоліками цих установок є низька ефективність процесу сепарації та складність конструкції, яка ненадійна в експлуатації.

Найбільш прогресивними, на думку деяких авторів, є вібраційні решета, що здійснюють не більше 60 коливань у секунду. Відмічається, що в такому випадку при вібросепарації зменшується внутрішнє тертя, покращуються умови самосепарації суміші, тобто таким чином підвищується технологічна ефективність сепарації [11]. Амплітуда коливань у такому сепараторі може досягати до 5 мм [1].

Використання відцентрових вібраційних приводів не дає можливості плавного налаштування частоти і амплітуди під час сепарації, хоча при наявності такого інструменту є можливість індивідуального налаштування цих параметрів на кожний тип зерна, що може надати змогу зменшити відсоток травмованого зерна. Прикладом такої системи є очищаюче-калібруюча машина Фадеева (рис. 2).

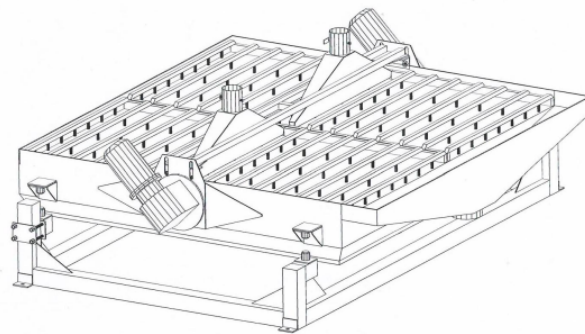


Рисунок 2 – Очищаюче-калібруюча машина Фадеева.

Зернові вібраційні сепаратори працюють у низьких частотах та при досить великій амплітуді, що не завжди дає змогу використовувати електромагнітні вібраційні приводи. Порівняно з гідравлічними, пневматичними, інерційними та електромагнітними віброзбуджувачами, перевагу мають магнітоелектричні вібратори (рис. 3) внаслідок широкого частотного діапазону роботи, відносно невеликої потужності споживання енергії та хороших питомих показників електромагнітної сили [3].

Конструктивні особливості визначаються діапазоном його робочої частоти, потужністю, амплітудою коливань та призначенням. Вібратори низького частотного діапазону (<100 Гц), як правило мають масивну рухому частину, на якій розміщені постійні магніти з радіальним чи аксіальним напрямком намагнічування, а також можуть мати феромагнітні полюси [3]. Як пружні елементи використовують циліндричні сталеві або пневматичні пружини.

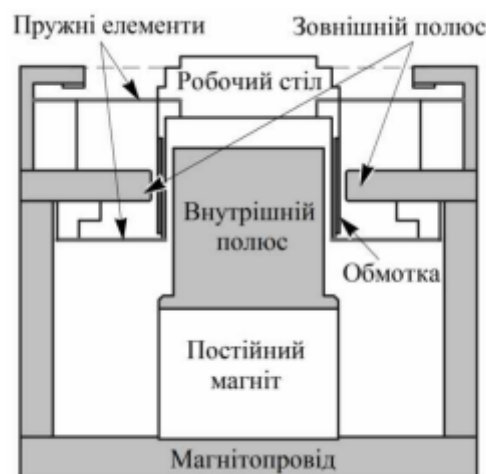


Рисунок 3 – Магнітоелектричний вібратор із частотним діапазоном (0 ... 2000 Гц)

Рухомою частиною здійснює коливальний рух в аксіальному напрямку з частотою струму джерела живлення й амплітудою, що визначається значенням електромагнітної сили та механічних параметрів електромагнітного вібратора [1].

Магнітоелектричні ж вібраційні пристрої відрізняються значною амплітудою коливань і виробляються в широкому діапазоні потужностей від мікромашин до потужних вібробудувачів з силою до 50 кН та типовим діапазоном робочої частоти 5... 3000 Гц [11]. Однак, проектування магнітоелектричних вібраційних систем ускладнене наявністю нелінійних ефектів, які суттєво впливають на робочі характеристики та динаміку пристрою [1]. Це ускладнює процеси моделювання та розрахунку таких систем.

А тому можливим є перехід у структурі вібраційних сепараторів від відцентрових до магнітоелектричних вібраційних приводів є в першу чергу за рахунок створення систем та моделей для їх розрахунку. За рахунок більш ефективної можливості керування магнітоелектричні приводи можуть надати змогу налаштування під певний тип зерна у досить невеликих рамках частоти і амплітуди коливань.

Висновки. Сепарація зерна є одним з найбільш важливих етапів у його післязбиральній підготовці. Від нього напряму залежить наскільки швидко зерно може зіпсуватись через зігрівання (якість сепарації та процент травмованості зерна). Для збільшення ефективності вібраційних сепараторів, а саме в першу чергу зменшення травмованості зерна доцільно переходити до можливості більш гнучкого налаштування характеристик сепарації (частота і амплітуда). Саме цю гнучкість може надати використання магнітоелектричних вібраційних приводів у системах сепарації, через свої характеристики.

Разом із тим залишається ряд невирішених питань, що потрібно дослідити у цьому напрямку:

1. Потрібно створити математичну модель на прикладі двохмасового вібраційного сепаратора з магнітоелектричним приводом.
2. Дослідження перехідних процесів і визначення раціональних законів керування частотою та амплітудою у двохмасовому вібраційному сепараторі з магнітоелектричним вібраційним приводом.
3. За рахунок подальшого аналізу моделі визначити енергетичні характеристики. Можливий позитивний економічний ефект за рахунок зменшення енергетичних витрат.

Список використаних джерел

1. Бондар Р. Визначення параметрів заступної схеми лінійного магнітоелектричного вібратора / Роман Бондар. // Автоматизація і інформаційні технології. – 2016. – №87. – С. 82–91.
2. Бутковский В. А. Технологии зерноперерабатывающих / В. А. Бутковский, А. И. Мерко, Е. М. Мельников. – Москва: Интеграф сервис, 1999. – 472 с.
3. Голенков Г. М. Электромеханические характеристики коаксиально-линейного двигателя с аксиальным и радиальным направлениями намагничивания постоянных магнитов / Г. М. Голенков, Аббасян Мохсен. // Техническая электродинамика. – 2014. – №3. – С. 64–69.
4. Егоров Г. А. Технология муки, крупы и комбикормов / Г. А. Егоров, Е. М. Мельников, Б. М. Максимчук. – Москва: Колос, 1984. – 376 с.
5. Захаров С. Е. Параметры и режимы работы горизонтального цилиндрического решета с планетарным вращением : дис. канд. техн. наук : 05.20.01 / Захаров Станислав Евгеньевич – Новосибирск, 2017. – 141 с.
6. Зерно. Очистка. Производство семян. Щадящие технологии Фадеева [Електронний ресурс] // СПЕЦ ЭММ – Режим доступу до ресурсу: <http://www.fadeevagro.com/books/zerno-ochistka-proizvodstvo-semyan-shhadjashhie-tehnologii-fadeeva/>.
7. Пат. РФ №2495402, МПК G01N15/02 (2006.01), B07B1/28 (2006.01). Ситовый анализатор / Самойлов В.А., Ярум А.И.; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. аграр. ун-т. – № 2012116190/05; заявл. 20.04.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 5 с.
8. Пат. РФ № 2465072, МПК В 06 В1/18. Гидродинамический диспергатор / Самойлов В.А., Ярум А.И.; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Заявл. 16.05.2011; опубл. 27.10.2012.
9. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна : дис. канд. техн. наук : 05.05.11 / Степаненко Сергій Петрович – Глеваха, 2008. – 120 с.
10. Технология сепарации зерна на вибрационной машине / [В. Н. Невзоров, Д. А. Кох, Ж. А. Кох та ін.]. // Вестник КрасГАУ. – 2018. – №5. – С. 198–202.
11. Турбинин Б. Г. Сельскохозяйственные машины / Б. Г. Турбинин, А. Б. Лурье. – Ленинград: Машиностроение, 1967. – 447 с. 8. Степаненко С.П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна. - Рукопис.

СЕКЦІЯ 2. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ

УДК 621.314.26

Авдеева О.А.¹, к.т.н., Садовий О.С.², к.т.н.¹Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв²Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв

УДОСКОНАЛЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З ВИТИМ СТРИЖНЕВИМ МАГНІТОПРОВОДОМ

Близько 50% втрат при номінальному навантаженні трансформаторів уявляють втрати неробочого руху. Витрати на їх відшкодування багатократно перевищують витрати втрат короткого замикання. В зв'язку з реальним неповним середнім навантаженням трансформаторів, зниження втрат неробочого руху уявляє актуальне і першочергове завдання [1-6].

Виробництво магнітопроводів трансформаторів і реакторів малої і середньої потужності шихтуванням пакетів доповнюється технологіями навивки стрічки або формування охоплюючих шарів розділенням та вигином ділянок смуги електротехнічної сталі (ЕТС). Виробництво витих магнітопроводів та їх аналогів зростає у зв'язку з розширенням використання аморфної ЕТС [1,2].

Відомою особливістю традиційних витих магнітопроводів є нерівномірність розподілу магнітного поля в прямокутних поперечних перерізах [3,4]. Витки ЕТС в зоні обмоткового витка та в зоні зовнішнього контуру мають відповідно мінімальну і максимальну довжини. Тому при заданій магніторушійній силі, яка є однаковою для всіх шарів (контурів) ЕТС, виникає зміна насичення та нерівномірність розподілу індукції B_{ci} вздовж координати b_{ci} (рис. 1,а) ширини осердя b_c . Підвищується індукція і насичення внутрішніх витків, а вигін та наклеп зовнішніх витків викликають додаткове підвищення магнітного опору периферійних шарів ЕТС. Це призводить до підвищення магніторушійної сили, що забезпечує заданий магнітний потік і електрорушійну силу обмотки та збільшення втрат в магнітопроводі [3,4]. Згідно [3], для зниження втрат у витому магнітопроводі, співвідношення довжин l_{cmax} і l_{cmin} зовнішньої і внутрішньої силових ліній поля, тобто практично довжин витків ЕТС на периферійних контурах магнітопроводу, повинно складати

$$l_{cmax}/l_{cmin} \leq 1,5 \quad (1)$$

Однак обмеження (1), особливо в розповсюджених стрижневих магнітопроводах, не відповідає оптимальним геометричним співвідношенням боків стрижнів [3,4].

Метою роботи є аналіз можливостей і особливостей зниження втрат та матеріаломісткості трансформаторів і реакторів на основі нетрадиційних конструкторсько-технологічних рішень магнітопроводів.

Одним із способів удосконалення трансформаторів і реакторів є застосування в магнітопроводах комбінації різних марок ЕТС, що відрізняються питомими характеристиками і вартістю [1,5].

Згідно [5] зниження втрат і намагнічувального струму однофазного трансформатора шляхом підвищення індукції в середній зоні поперечного перерізу витого магнітопроводу (рис. 1,б) досягається застосуванням трисекційного кола (рис. 2) з різновидів ЕТС. Середня секція виконана з ЕТС, що відрізняється кращими магнітними властивостями.

Іншим способом удосконалення електромеханічних пристроїв є структурно-геометричне перетворення активних елементів, зокрема застосування в магнітопроводах трансформаторів і реакторів багатограних перерізів стрижнів [6].

Більш раціональним за вартістю технічним рішенням задачі зниження магнітного опору середніх ділянок та загальних втрат магнітного кола можна вважати формування витого магнітопроводу з шестигранним поперечним перерізом. Такий магнітопровід (рис. 3, а, б) виконується з двох пар довжин чотирьох клиноподібних стрічок $abdc$ і $a'b'd'c'$, які є ідентичними в парі (рис. 3, в) [7]. Фігурне розкроєння стрічки (рулону) ЕТС технологічних труднощів не викликає і застосовується при виготовленні витих просторових магнітопроводів трифазних трансформаторів [2].

Заміна традиційних прямокутних перерізів стрижнів на шестигранні також приводить до підвищення надійності та зменшення середніх довжин витків обмоток і в цілому надає можливість деякого покращення показників технічного рівня однофазного трансформатора [8].

Висновок. Перспективний напрямок зниження втрат і матеріаломісткості трансформаторів являється у використанні нетрадиційних взаємозв'язків компонент, структур і конфігурацій елементів магнітопроводів і обмоток, зокрема секціонування та застосування шестигранного поперечного перерізу.

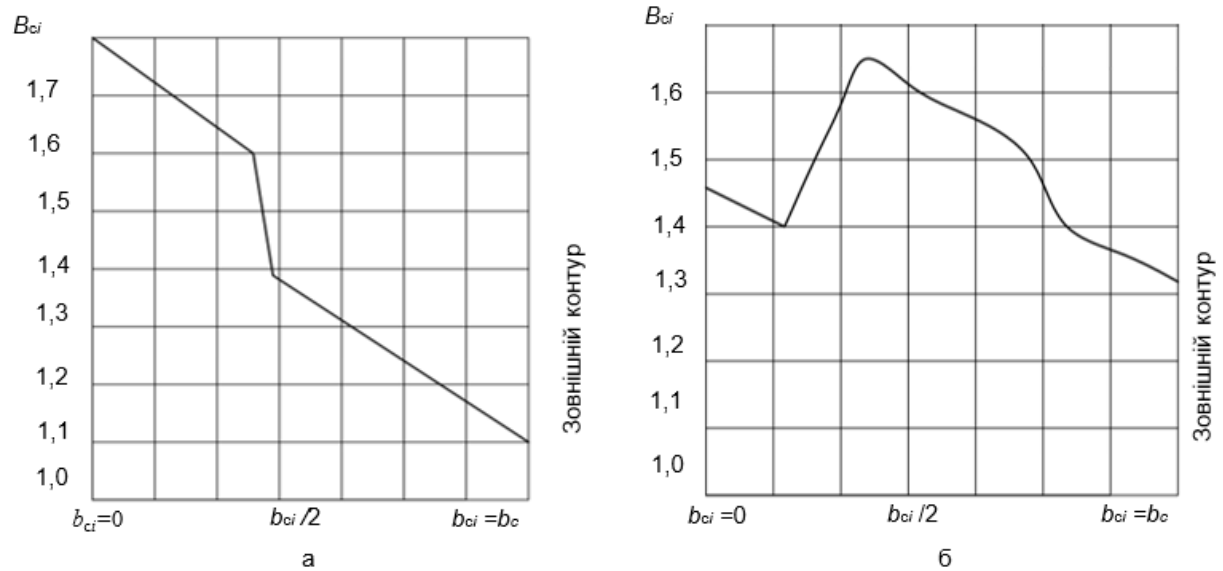


Рис. 1. Варіанти розподілу амплітудного значення індукції в поперечному перерізі витого магнітопроводу при ідентичності марки сталі всіх шарів (а) та застосуванні трьох секцій з кращими магнітними властивостями сталі середньої секції (б) [5]

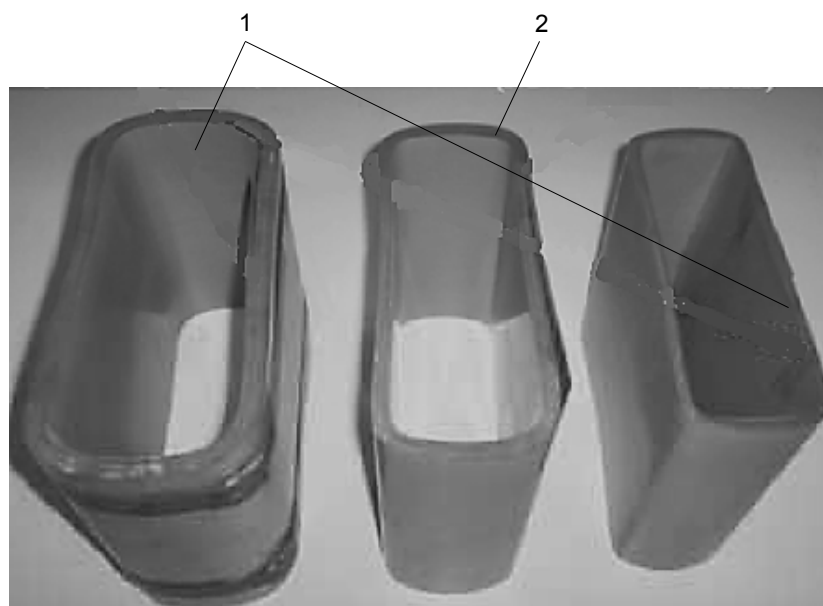


Рис. 2. Бокові 1 та середня 2 частини трисекційного магнітопроводу, що відрізняються вартістю та магнітними властивостями електротехнічної сталі [5]

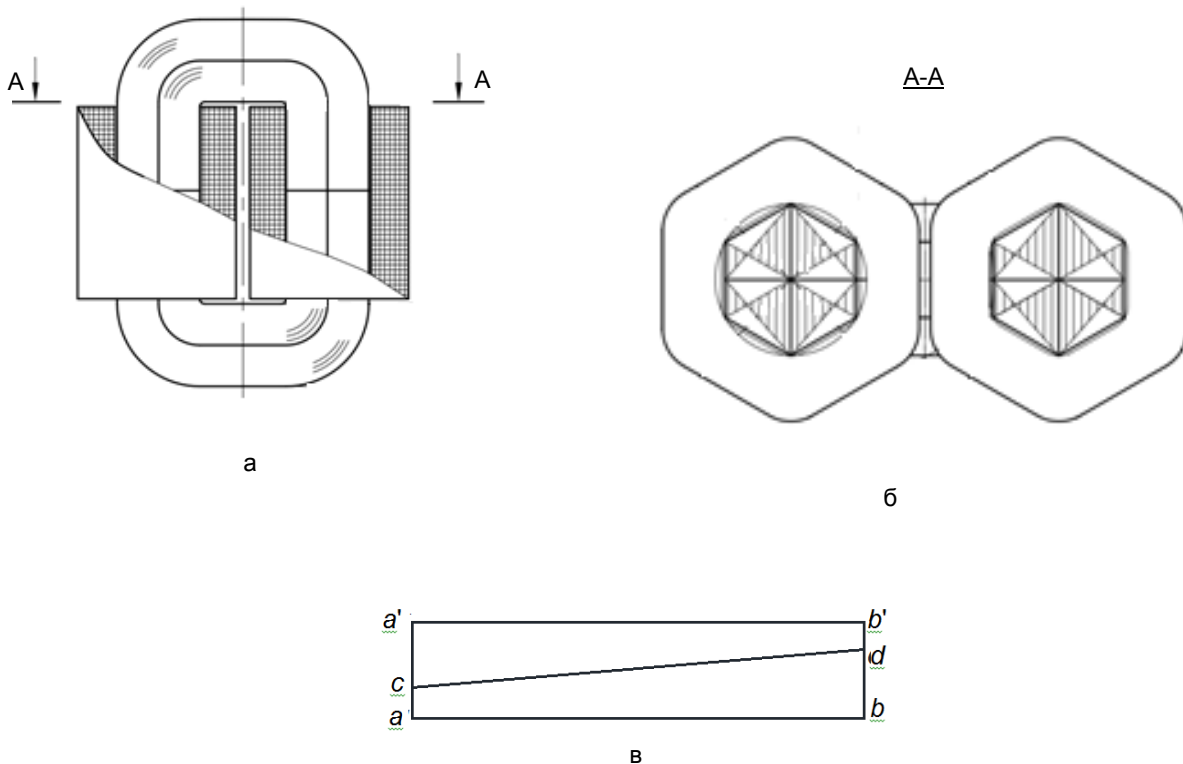


Рис. 3 Конструктивна схема (а) поперечний переріз (б) однофазної електромагнітної системи з витим секціонованим магнітопроводом і секційні розгортки (в), що виконується косим поділом прямокутної смуги електротехнічної сталі

Список використаних джерел

1. Костинский С.С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкций силовых трансформаторов // Проблемы энергетики. - 2018. № 1-2.- с. 14-32.
2. Инновационный прорыв на рынке силовых трансформаторов. – Режим доступа: [https:// www/ elec. ru / articles innovacionnyj- proryv na rynke silovyh – transformato /](https://www.elec.ru/articles/innovacionnyj-proryv-na-rynke-silovyh-transformatorov/) - Дата звернення 22.06.2020.
3. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. Москва: Советское радио, 1971.-720с.
4. Белополюский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Москва: Альянс, 2013 - 400с.
5. Themistoklis D. Kefalas Transformers made of composite magnetic cores : An innovative design approach // National University of Athens, 2009.p. 1-12.
6. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Авдеева Е.А. Оптимизационный сравнительный анализ структур статических электромагнитных систем. Варианты и метод оценки преобразования. Электричество.- 2014. №9 –с.34-43.
7. Пат.65005 Україна МПК НОІФ 27/24. Магнітопровід індукційного статичного пристрою // Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Авдєєва О.А. , Садовий О.С., Циганов О.М. (Україна) - № 201104986; Заявл. 20.04.2011; Опубл. 25.11.2011, Бюл. №22 - 3с.
8. Садовий А.С. Сравнительный анализ массосиловых показателей однофазных трансформаторов и реакторов с прямоугольными и шестигранными сечениями стержней стержневого витого магнитопровода. // Вісника аграрної науки Причорномор'я-2016.- №4(92).-с. 143-153.

УДК 621.314.26

Жук О.К., к.т.н., Дзисюк Я.В., Буряк В.С.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНИХ МІКРОМЕРЕЖАХ МОРСЬКИХ СУДЕН І ПЛАВСПОРУД

Актуальність. Генеральним напрямком удосконалення автономних енергетичних систем морських суден та плавспоруд є підвищення їх енергоефективності (раціоналізація витрачання і використання паливних

ресурсів). В таких системах найчастіше первинними джерелами механічної енергії є дизельні двигуни, в яких коефіцієнт використання палива складає всього 40%, а решта розсіюється через теплові втрати та вихлоп. Суднові енергетичні установки є також джерелами викидів парникових газів (CO_2 , NO_x , CH_4 і т.п.). Один тільки сектор судноплавства створює сьогодні 15% глобальних викидів оксиду азоту NO_x і існує тенденція їх збільшення у майбутньому. Тому Міжнародна морська організація (IMO) встановила обмеження на викиди з суден, які регулюються Міжнародною конвенцією по запобіганню забруднення з суден (MARPOL) [1]. Отже, енергетичні установки майбутніх суден повинні скоротити споживання палива і виключити понаднормові викиди, щоб відповідати нормам MARPOL і інших регулюючих органів.

Зазначена мета досягається шляхом широкого застосування в архітектурі автономних електроенергетичних систем (ЕЕС) засобів силової електроніки – потужних напівпровідникових перетворювачів (НП), які використовуються, насамперед в гребних електроустановках (ГЕУ). Головною перевагою ГЕУ є можливість оптимізувати завантаження головних теплових двигунів для отримання максимального ККД та зменшення витрат палива з одночасним досягненням більшої маневреності. Крім того, відсутність на судах з електричним рухом протяжного гребного вала дозволяє раціональніше використовувати внутрішньосудновий простір. Використання НП дозволяє створювати гібридні енергоелектричні системи, орієнтовані на використання відновлювальних і екологічно чистих джерел енергії (паливних елементів, сонця, вітру) [2].

Однак, функціонування напівпровідникових перетворювачів викликає зниження якості електроенергії та породжує проблему електромагнітної сумісності в автономній мережі. Зареєстровано ряд серйозних аварій і пожеж на судах і бурових платформах, що сталися через неприпустимий рівень гармонічних спотворень напруг і струмів в ЕЕС, зумовлених функціонуванням НП) [3]. Для запобігання подібних аварій, забезпечення надійного функціонування суден і безпеки екіпажів морські регулюючі органи разом з IEC, IEEE, ABC та ін. розробляють стандарти якості електроенергії з підвищеними вимогами до її показників [4].

Енергоефективність та якість електроенергії мають глибокий внутрішній зв'язок та взаємний вплив. **Метою даної роботи** є аналіз основних напрямів забезпечення енергоефективності та якості електроенергії в суднових енергоустановках з потужними НП шляхом врахування структурних та режимних факторів впливу на відповідні поняття та показників, що їх визначають.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз архітектури ЕЕС з НП на сучасних морських об'єктах;
- аналіз топології НП та комплексів на їх основі;
- аналіз шляхів удосконалення структури мікропроцесорних систем керування і захисту ЕЕС з НП;
- визначення показників енергоефективності та способів їх підвищення;
- аналіз стандартів якості електроенергії в ЕЕС з НП та засобів забезпечення їхніх вимог.

Електричний рух широко використовується практично на всіх категоріях суден: пасажирських, комерційних, військових кораблях. Це стосується, насамперед, таких конкретних класів суден як пороми, круїзні лайнери, танкери для транспортування нафти та скрапленого природного газу (СПГ), контейнеровози та балкери, бурові судна і судна технічного флоту, криголами. На сучасних судах з електричним рухом знайшли застосування структури так званих єдиних (інтегрованих) ЕЕС з двома або більшою кількістю секцій головного розподільчого щита (ГРЩ). Однолінійні схеми деяких типових ЕЕС відповідних суден представлені на рисунках 1 – 4.

Архітектура ЕЕС та НП. Незважаючи на різноманітність суден, конфігурації ЕЕС з ГЕУ та характеристики їхніх елементів мають спільні риси:

1. Використовується топологія єдиної (інтегрованої) схеми ЕЕС, коли до кожної секції головного розподільчого щита (ГРЩ) зі спільними шинами змінного струму приєднані дизель-генератори та навантаження (системи ГЕУ та загальносуднові споживачі), які одержують живлення через силові трансформатори.
2. Велика номінальна потужність ЕЕС. Потужність кожної секції може досягати 20 МВт, а загальна встановлена потужність генераторів – 80 МВт і більше. Наприклад, у найбільшого на сьогодні круїзного лайнера «Allure of the Seas» потужності ЕЕС та ГЕУ становлять відповідно 97 МВт і 60 МВт.
3. В потужних суднових ЕЕС використовується високовольтна напруга (наприклад, 11кВ – на шинах ГРЩ та 3,3 кВ – на вході вентильного блоку НП. У найменш потужних ЕЕС поромів напруга на шинах ГРЩ становить 690 В.

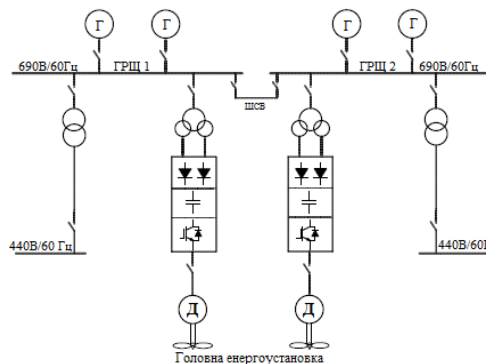


Рисунок 1 – схема ЕЕС пасажирського порома

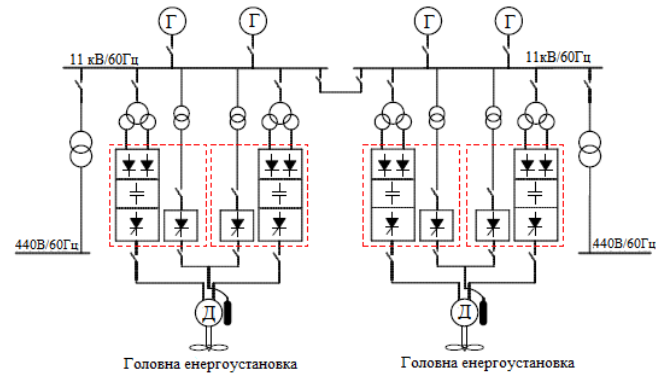


Рисунок 2 – схема ЕЕС круїзного судна

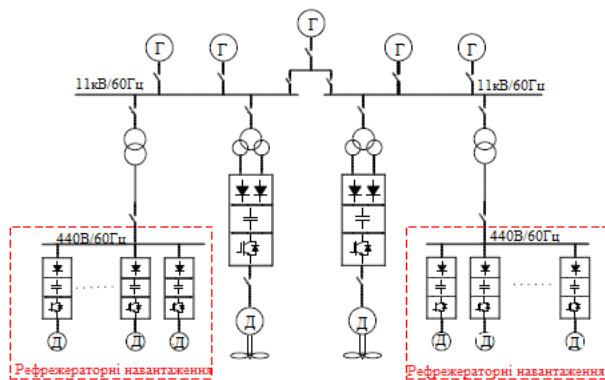


Рисунок 3 – схема ЕЕС рефрижераторного контейнеровоза

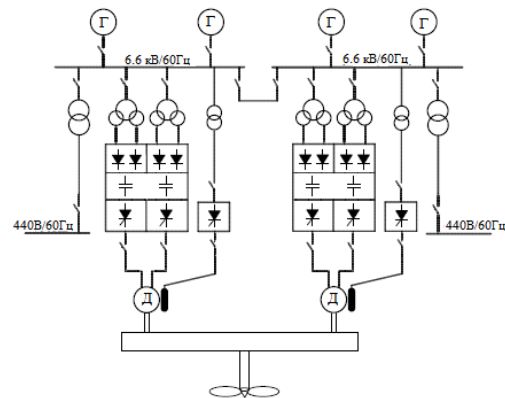


Рисунок 4 – схема ЕЕС танкера СПГ

4. В сучасних гребних та підрулюючих установках використовуються перетворювачі частоти (ПЧ) з ланкою постійного струму за схемою «випрямляч (В) – автономний інвертор (АІ)». Найбільш розповсюдженими типами інверторів є автономний інвертор струму (АІС) на одноопераційних SCR тиристорах та автономний інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) на GTO або IGBT модулях. Схеми ПЧ з АІТ та АІН наведено на рисунках 5 і 6.

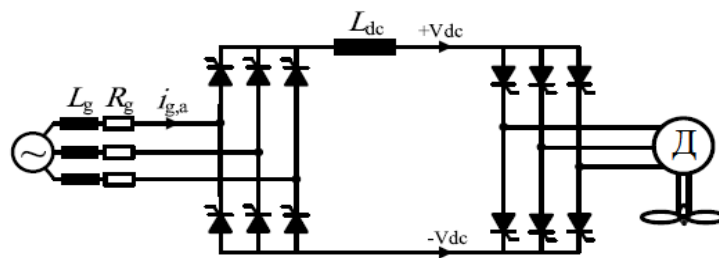


Рисунок 5 – схема ПЧ з АІС

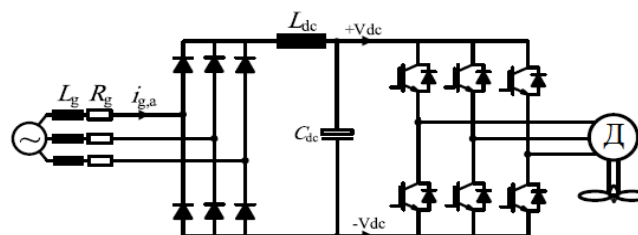


Рисунок 6 – схема ПЧ з АІН

5. В ГЕУ найбільшої потужності використовуються АІС з гребними синхронними двигунами, необхідними для комутації тиристорів, а також керовані тиристорні випрямлячі зі згладжувальними дроселями на боці

постійного струму [5]. Сучасна концепція гребного електропривода з асинхронним короткозамкненим двигуном (АД) віддає перевагу ПЧ з некерованим випрямлячем і АІН з ШІМ. Згладжування вхідної постійної напруги АІН забезпечується LC- або C-фільтром в ланці постійного струму. Сьогодні АІН з ШІМ став стандартним рішенням для ГЕУ. Ця концепція найбільш підходить для ГЕУ з високооборотним АД та понижуючим редуктором, що є найбільш компактним, енергоефективним та економічно ефективним рішенням [6].

6. Гребний гвинт може з'єднуватись з ГЕД безпосередньо через короткий вал, що проходить через корпус судна, або через використання азимутальних гвинтувальних колонок типів Z, L і Azipod. В перших двох типах двигун розміщується усередині судна, в колонку типу Z його вал входить вертикально, а в колонку типу L – горизонтально. В безредукторній системі Azipod двигун вбудовано усередині герметичного модуля (гондоли) поза корпусом судна, а гвинт знаходиться на його валу. Azipod є одночасно і рушієм, і засобом керованості судна, створює підводну тягу до 25 МВт.

7. Для поліпшення якості електроенергії в судновій мережі і зменшення спотворень струму, що споживається ПЧ, стандартним рішенням є підвищення пульсності вхідного випрямляча (з 6 до 12 або 24) шляхом використання силового трансформатора з декількома фазоповоротними вторинними обмотками та більшою кількістю випрямних мостів. Забезпечення практично синусоїдальної форми струму асинхронних ГЕД досягається без застосування додаткових вихідних фільтрів ПЧ за рахунок використання багаторівневих АІН з ШІМ.

8. У морському виконанні згідно стандарту IEEE 1676-2010 використовується загальна архітектура системи керування (контролю) і захисту силовим НП [7], [8], показана на рисунку 7.

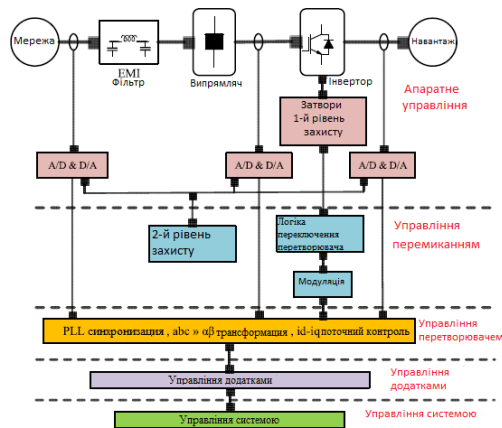


Рисунок 7 – архітектура системи керування і захисту силового НП

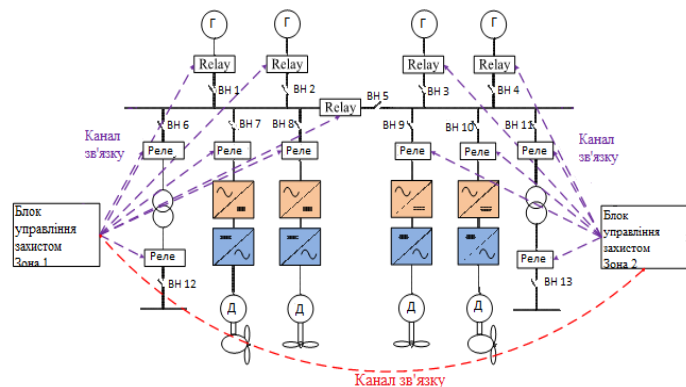


Рисунок 8 – децентралізована система захисту

Система контролю побудована за ієрархічним багатоплановим принципом з наступними рівнями:

- найвищий загальносистемний рівень;
- рівень додатків (законів керування електроприводом);
- рівень загального керування НП зі зворотними зв'язками;
- рівень драйверів керування напівпровідниковими ключами силової схеми НП;
- апаратний рівень – комутаційна апаратура та датчики контролю і захисту.

Система захисту повинна виявляти будь-які несправності (у тому числі і погіршення показників якості електроенергії) та ізолювати будь-яку несправну частину системи. Основні вимоги до цієї системи: вибірковість, швидкодія, надійність, простота та економічність. На більшості існуючих морських суден застосовується принцип централізованого захисту, коли центральний блок контролює всю ЕЕС і змінює налаштування реле і розмикачів. Однак, для підвищення надійності у морських застосуваннях кращим вважається принцип децентралізованого зонального розподіленого захисту [7], який ілюстровано рисунком 8.

Показники енергоефективності та способи їх покращення. Недавні дослідження свідчать, що світові морські перевезення споживають біля 300 мільйонів метричних тон палива на рік [8]. В основному, це суміші важкого мазуту і більш легкого палива, т.з. важке морське дизельне паливо, при згоранні якого виділяються парникові гази – CO_2 , NO_x і SO_2 . Сектор судноплавства створює 3% і 15% глобальних викидів CO_2 і NO_x відповідно. Оскільки підвищення ефективності використання енергії / палива і зниження викидів парникових газів взаємопов'язані, IMO у 2011 р. ініціювала проектування енергоефективності, згідно з чим було запропоновано теоретичний показник енергоефективності – індекс EEDI (The Energy Efficiency Design Index), якому повинні

відповідати всі судна, побудовані після 2013 р. EEDI поєднує у оцінці енергоефективності обсяги викидів CO_2 і обсяги корисних перевезень на миль у вигляді їх відношення і має розмірність ($\text{г CO}_2 / \text{т} \cdot \text{миля}$). Використання EEDI при визначенні енергоефективності ґрунтується на його корельованості з іншим спорідненим показником — питомими витратами палива на одиницю потужності головних двигунів – індексом EEOI, розмірність якого ($\text{г} / \text{кВт} \cdot \text{год}$).

Повна формула розрахунку EEDI вельми складна і містить велику кількість поправочних коефіцієнтів, що визначаються конкретними умовами експлуатації та класом судна [9, 10], але може бути зведена до вигляду $EEDI = (A + B + C - D)/E$, де A, B, C – викиди CO_2 відповідно головних двигунів, допоміжних двигунів, двигунів генераторних установок, D – скорочення викидів завдяки інноваційним технологіям, E – обсяги корисних перевезень (транспортна робота). Таким чином, судно, енергоефективність якого відповідає вимогам ІМО, повинно мати значення EEDI, яке не перевищує відповідний норматив.

До способів підвищення енергоефективності відносяться:

- удосконалення конструкції судна (чим менший EEDI, тим більш енергоефективна конструкція);
- заміна важкого морського дизельного палива СПГ;
- зменшення питомої витрати палива і збільшення ККД в умовах неповного (нижче 50%) завантаження дизельного двигуна шляхом збільшення частоти його обертання у відповідно до залежностей, наведених на рисунку 9 [11];
- перехід до нової архітектури єдиної ЕЕС з шинами постійного струму (рисунк 10), оскільки підвищення ефективності дизельного двигуна в дизель-генераторній установці шляхом регулювання частоти обертання у відповідності до профілю навантаження в звичайній єдиній ЕЕС з шинами змінного струму практично неможливо;
- використання в ЕЕС вбудованої системи накопичення енергії – Energy Storage System (ESS) з використанням потужних напівпровідникових перетворювачів і акумуляторних батарей для досягнення сталого і оптимального завантаження дизелів в умовах різких змін навантаження ЕЕС в цілому [12].

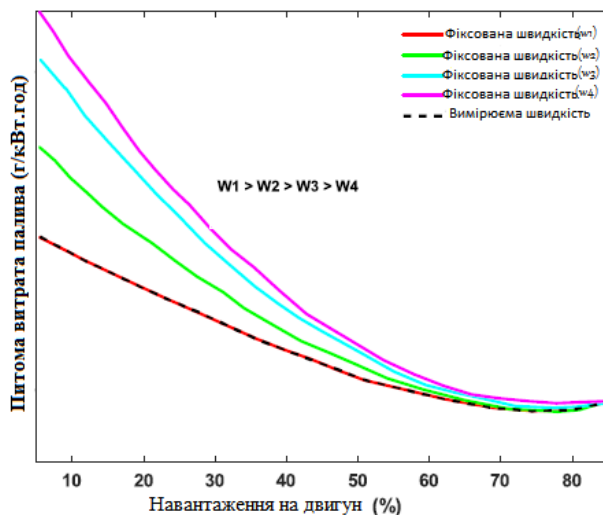


Рисунок 9 – питомі витрати палива при різному з навантаженні і частоті обертання дизельного двигуна

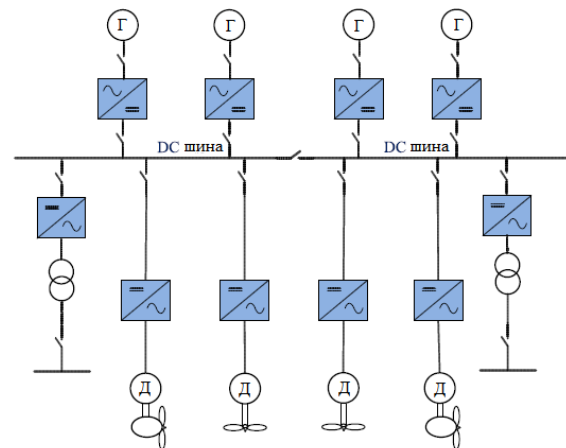


Рисунок 10 – схема єдиної суднової ЕЕС шинами постійного струму

В системі, показаній на рисунку 10 частота обертання дизелів і частота струму дизель-генераторів може вільно змінюватись за необхідністю. Стабілізація частоти і напруги живлення загальносуднових навантажень забезпечується за рахунок додаткових DC/AC перетворювачів порівняно невеликої потужності.

Основні показники якості електроенергії в суднових ЕЕС та їх забезпечення.

В суднових ЕЕС використовуються джерела електроенергії – синхронні генератори у морському виконанні, які мають відносно високий опір К.З.(15 – 20 %) , що викликає надмірні рівні гармонічних спотворень напруги внаслідок споживання НП несинусоїдальних струмів. Міжнародні стандарти IEC / ISO / IEEE , якими керується ІМО, визначають норми на наступні головні показники якості електроенергії [13]:

- коефіцієнти несинусоїдальності напруги по окремих гармонікам і інтегральний (THD – Total Harmonic Distortion), відповідно $K_{U(n)} = U_{(n)} / U_{(1)}$ та $K_U = (\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2)^{0.5} / U_{(1)}$;

- відповідні коефіцієнти, $K_{I(n)}$ та K_I , що визначають несинусоїдальність струму.

Основним показником енергоефективності ПЧ, що одночасно впливає і на якість електроенергії, є їхній коефіцієнт потужності — відношення активної потужності перетворювача до його повної потужності [13]:

$\chi = P_{\text{акт}}/S_{\text{п}} = \lambda \cdot \cos \varphi_{(1)}$, де $\lambda = [(1 + K_{\text{г}}^2)(1 + K_{\text{т}}^2)]^{-0.5}$ — коефіцієнт спотворення, $\cos \varphi_{(1)}$ — коефіцієнт зсуву їхніх основних гармонік напруги і струму.

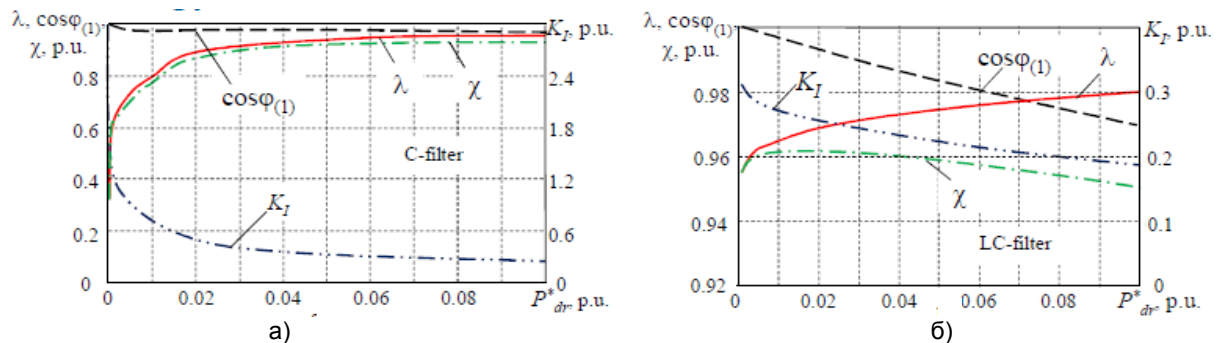


Рисунок 11 – залежності коефіцієнта потужності ПЧ та його складових в схемах – а) – з ємнісним згладжувальним фільтром; б) – з індуктивно-ємнісним згладжувальним фільтром

На рисунку 11, а, б наведено одержані в [13] узагальнені залежності χ та його складових від відносної потужності ПЧ $P_{\text{п}}^* = P_{\text{п}}/S_{\text{п}}$ ($S_{\text{п}}$ — повна потужність К. З. у точці підключення випрямляча у складі ПЧ). Сімейства залежностей побудовані для ПЧ за схемою В — АІН з ШІМ відповідно з ємнісним (рис.11 а) та індуктивно-ємнісним (рис.11 б) згладжувальними фільтрами.

З рисунку 11 а випливає, що підвищення коефіцієнта потужності ($\chi \geq 0.9$) при одночасному зменшенні спотворення споживаного струму ($K_{\text{г}} \leq 0.35$) можливо і для схеми ПЧ з порівняно дешевим ємнісним фільтром, якщо забезпечено режим при $P^* \geq 0.03$. Для досягнення цієї мети завжди можна використати підключення ПЧ через трансформатор або додатковий лінійний реактор.

Висновки: виконано дослідження основних напрямів забезпечення енергоефективності та якості електроенергії в суднових енергоустановках з потужними НП, запропоновані методи і засоби їх реалізації.

Список використаних джерел

1. MARPOL Annex VI Chapter 4: Energy Efficiency Regulations for Ships, Int. Mar. Org., London, U.K., 2011.
2. R. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, and J. J. Hopman, "Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments," J. Appl. Energy, vol. 194, pp. 30-54, 2017.
3. Reference List Miscellaneous Types of Vessels Low Voltage Propulsion. [Online]. Available: https://w3.siemens.no/home/no/no/sector/industry/marine/Documents/Miscellaneous-Types%20of-vessels-references_V2017.pdf
4. MAN Diesel & Turbo. EEDI Energy Efficiency Design Index. [Online] Available: <https://marine.mandieselturbo>.
5. A. K. Ådnes, A. J. Sørensen, and T. Hackman, "Essential characteristics of electrical propulsion and thruster drives in DP vessels," in Proc. Dyn. Positioning Conf., 1997, pp. 1-20.
6. A. J. Sørensen, "Marine control systems: Propulsion and motion control systems of ships and ocean structures," Norwegian Univ. Sci. Technol., Trondheim, Norway, Lecture Notes, 2012. [Online]. Available: <http://folk.ntnu.no/assor/publications/marcyb.pdf>.
7. IEEE Guide for Control Architecture for High Power Electronics (1 MW and Greater) Used in Electric Power Transmission and Distribution Systems, IEEE Standard 1676, 2010.
8. Y. Khersonsky, "New IEEE power electronics standards for ships," in Proc. Electr. Mach. Tech. Symp. (EMTS), 2012, pp. 1-10.
9. Interim Guidelines on the Method of Calculation of the Energy Efficiency Design Index for New Ships, document MEPC.1/Circ.681, Aug. 2009
10. Indian Register Shipping, Powai, India. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI). [Online]. Available: <https://www.irclass.org/media/1393/energy-efficiency-design-index.pdf>
11. Z. Jin, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, L. Meng, and J. M. Guerrero, "Maritime DC microgrids—a combination of microgrid technologies and maritime onboard power system for future ships," in Proc. IEEE 8th Int. Power Electron. Motion Control Conf. (IPEMC-ECCE Asia), May 2016, pp. 179184.
12. E. Fridell, H. Winnes, and L. Styhre, "Measures to improve energy efficiency in shipping," FAL Bull., Vol. 8, no. 324, p. 10, 2013.
13. O. Zhuk, D. Zhuk, O. D'yakonov. Input Voltages and Currents Distortion and Power Factor of Frequency Converters // 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Conference Proceedings, 2020, Kyiv, Ukraine. IEEE Catalog Number: CFP2005U-ART ISBN: 978-1-7281-9713-5, pp. 791 – 796

УДК 621.314.26

Циганов О.М.

Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв

НАПРЯМОК УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ОСНОВІ СЕКЦІОНУВАННЯ ТА КОМБІНАЦІЇ МАРОК СТАЛІ ШИХТОВАНИХ МАГНІТОПРОВОДІВ

Енергоматеріалосними та головними елементами систем електропостачання, а також важливими компонентами комплексів електрообладнання є трансформатори різної потужності. Втрати в силових розподільчих трансформаторах складають 1/3 від загальних втрат енергосистем. Основна частина цих втрат приходить на трансформатори I-III габаритів, особливо потужністю до 630 кВ·А. Тому зниження втрат таких трансформаторів уявляє важливу актуальну задачу [1].

Електромагнітні системи (ЕМС) значної частини вказаних трансформаторів потужністю з 16 кВ·А виконуються з круговими утворюючими контурами (УК) стрижнів і обмоткових катушок та з шихтованими магнітопроводами. В діапазоні потужності від 16 до 10000 кВ·А коефіцієнти заповнення кругових УК східчастими перерізами стрижнів складають $K_{\text{кк}}=0,851 - 0,931$ при числі пакетів пластин електротехнічної сталі (ЕТС) різної ширини в половині кола 3-16 [1]. Недостатнє заповнення УК з $K_{\text{кк}} < 0,9$ суттєво підвищує матеріалоемність, а виконання ЕМС з $K_{\text{кк}} > 0,9$ суттєво збільшує трудомісткість виготовлення магнітопроводів. Підвищення матеріалоемності при заданому рівні електромагнітних навантажень викликає підвищення втрат. Іншим відомим недоліком кругових УК є внутрішні механічні напруги кільцевого вигину витків обмоток. Такі напруги при короткому замиканні складаються з напругами від електродинамічних сил, що знижує електродинамічну стійкість трансформаторів [3]. Іншими проблемними питаннями є зростання втрат готового магнітопроводу відносно питомих втрат ЕТС. Зростання втрат обумовлено шихтуванням шарів ЕТС "вперепліт" та використанням в сучасних трансформаторах анізотропної ЕТС. Незалежно від форми стиків (прямі, косі) втрати в текстурованих шихтованих магнітопроводах зростають на 37 – 58 % [4].

Основними способами удосконалення трансформаторів, як і інших електромеханічних пристроїв, є застосування кращих електротехнічних матеріалів. Такий спосіб застосований тривалий час при незмінності на протязі більш століття "традиційних" структур і конструкцій ЕМС з вказаними вище недоліками. Такі конструкції досягли повної межі розвитку. Іншим шляхом удосконалення електромеханічних пристроїв є структурно-геометричні перетворення активних елементів та застосування нетрадиційних конструктивно-технологічних рішень магнітопроводів [5].

Мета роботи – аналіз можливості і особливостей зниження матеріалоемності та втрат трансформаторів на основі інноваційних конструктивно-технологічних рішень шихтованих магнітопроводів.

Зниження матеріалоемності і втрат магнітопроводу, а також підвищення електродинамічної стійкості обмоток досягається застосуванням замість криволінійних багатограних УК [6].

Удосконалення трансформаторів з шихтованими магнітопроводами можливо застосуванням в планарних ЕМС восьмигранних УК стрижнів і обмоткових катушок. При трьох і чотирьох сходинках в половині восьмигранного УК забезпечуються коефіцієнти заповнення відповідно $K_{\text{кв3}}=0,9$ і $K_{\text{кв4}}=0,931$ при зниженні трудомісткості виробництва відносно аналогів з близькими $K_{\text{кк}}$. Іншою перевагою восьмигранного УК є відсутність механічних напруг на прямих ділянках витків обмоток. Такі напруги концентруються на вершинах кутів восьмигранних УК витків, де підсилюється ізоляція і встановлюються опорні елементи обмотки (прошивні рейки) [7].

Згідно [8] мінімальні втрати в шихтованому магнітопроводі досягаються усуненням вихрових втрат ортогонального площині шарів ЕТС переходу силових ліній поля при складанні ділянок магнітного кола вперепліт. Вказане усунення досягається сопряженням стрижневих і яремних частин магнітопроводу з ізолюванням плоских стиків. Однак при цьому збільшуються магнітний опір і намагнічувальний струм та втрати реактивної потужності.

Компромісним рішенням зниження активних втрат та забезпечення допустимого рівня втрат реактивної потужності трансформатора є секціонування магнітопроводу, тобто виконання середньої частини шихтовкою вперепліт (рис. 1, а), та виконання бічних частин (секцій) стиковими з формуванням перерізів стрижнів (рис. 1, б) [9]. Таким чином утворюється комбінований магнітопровід з $K_{\text{кв}} \approx 1$, що забезпечує максимальне зниження втрат та матеріалоемності. Стрижневі та яремні частини бічних секцій утворюються розрізами пакетів ідентичних прямокутних пластин, що складаються з зсувом (рис. 1, в). Після розрізу пластини зсуваються для отримання заданого кута 45° (рис. 1, г). При застосуванні автоматизованого обладнання пакети пластин різної довжини формуються розділом стрічки (рулону) ЕТС з малим шагом подачі.

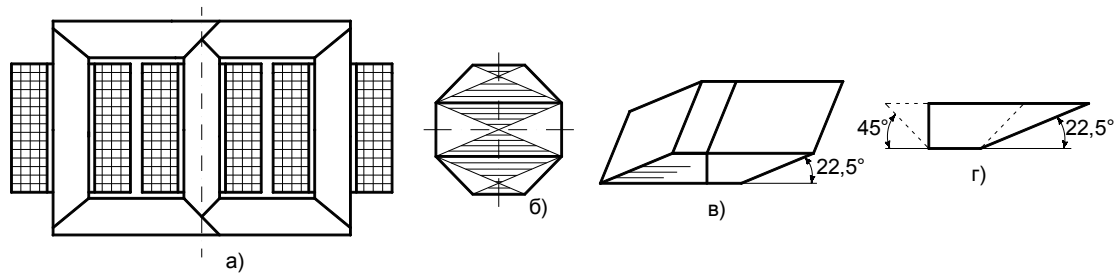


Рисунок 1 – Схеми повздовжнього перерізу середньої секції (а) і поперечного перерізу стрижня (б) та схеми заготовки (в) та елемента (г) комбінованого магнітопроводу

Згідно [10] зниження втрат в кутових зонах зміни напрямку магнітного потоку відносно текстури елементів магнітопроводу можливо при застосуванні комбінації марок ізотропної і анізотропної ЕТС в суміжних шарах стрижнів і ярем. При цьому перехід магнітного потоку з стрижня в яро відбувається в ізотропній ЕТС, однак підвищуються основні втрати в стрижневих та яремних ділянках з ізотропної ЕТС відносно аналогічних ділянок з анізотропної ЕТС.

Суттєве значення втрат можливо виконанням усіх кутових ділянок комбінованого магнітопроводу з ізотропної ЕТС і усіх стрижневих і яремних ділянок з анізотропної ЕТС. Однак подвоюється число стиків, що підвищує додаткові втрати і намагнічувальний струм та ускладнюється забезпечення конструктивної жорсткості магнітопроводу. Подальший розвиток пропозицій нетрадиційних структур уявляються у застосуванні комбінованих пластин ЕТС шевронної форми відповідно з кутовими анізотропними і яремно-стрижневими ізотропними ділянками (рис. 2) [11]. Нероз'ємне з'єднання анізотропних і ізотропних ділянок шевронних пластин в стиках зварюванням, знижує струм і втрати неробочого ходу. Вилучення суттєвого ускладнення виробництва магнітопроводу з з'єднанням стиків елементів шевронів можливо інтегральним зварюванням і поперечним поділом заготовок [12]. Комбіновані пластини виконують з заготовок, що утворюються суміщенням і з'єднанням по лініям стику фрагментів полос анізотропної (рис. 3, а) і ізотропної (рис. 3. б) ЕТС. До фрагменту (фрагментів) полоси анізотропні ЕТС приварюються фрагменти полоси ізотропної ЕТС. Перед з'єднанням фрагментів анізотропної компоненти розташовуються з напрямками, що паралельні лініям розділу (рис. 3, в). Розділені ділянки фрагментів поділяються під заданими кутами на пластини варіантів магнітопроводу (рис. 2).

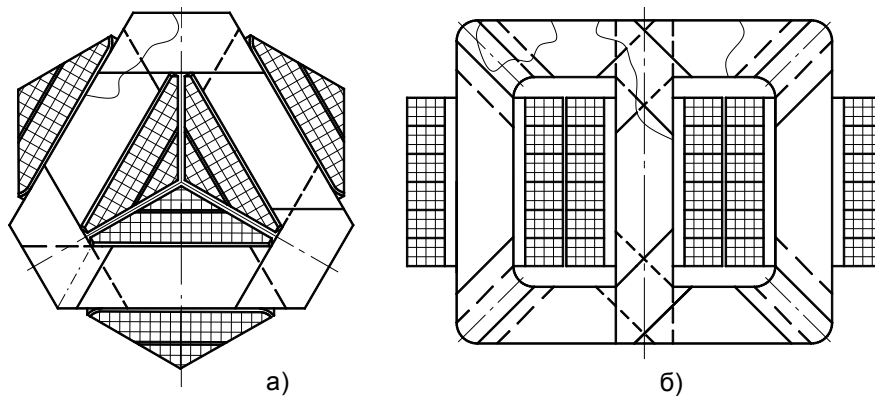


Рисунок 2 – Шихтовані магнітопроводи з шевронних пластин комбінації ізотропної і анізотропної і анізотропної електротехнічних сталей в складі однофазної (а) і трифазної (б) електромагнітних систем

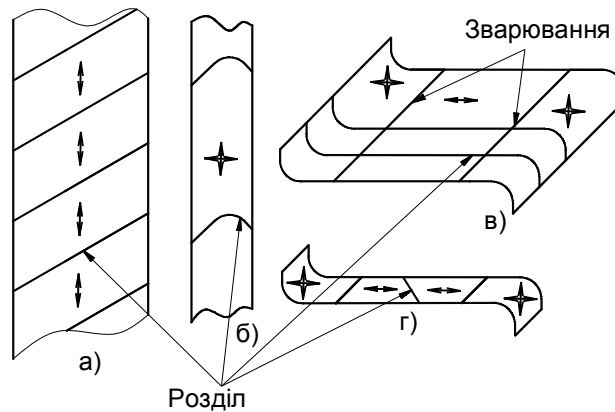


Рисунок 3 – Компоненти комбінованого магнітопроводу: поперечний розділ прокату анізотропної (↔★) (а) та ізотропної (★) (б) електротехнічних сталей на фрагменти; зварювання фрагментів по лініям стиків в заготовку та її поперечне розділення на ділянки (в); розділення ділянок фрагментів на комбіновані пластини (г).

Висновок. Перспективні напрямки зниження втрат і матеріаломісткості трансформаторів уявляються в секціонуванні магнітопроводів та суміщенні ділянок нетрадиційних конфігурацій та марок ізотропної і анізотропної ЕТС, а також суміжних електротехнологій, зокрема електричного зварювання.

Список використаних джерел

1. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных трансформаторов (перепечатано с сокращениями из издания Европейского института меди, тема «В» совместного с Европейской комиссией проекта № STR – 1678 – 98 – BE). Перевод с английского Е. В. Мельниковой, редактор перевода В. С. Ионов // Энергосбережение. – 2003. № 6 – С. 14–15, 2004. № 1 – С. 61–65.
2. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – М.: Альянс, 2013. – 528 с.
3. Лазарев В. И. Обобщение результатов исследований по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов / В. И. Лазарев // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 53–60.
4. С. Д., Лоханин А. К. Силовые трансформаторы: Справочная книга: под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 616 с.
5. Ставинский А. А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнітопроводами) *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 5. С. 43 – 47.
6. Stavinsky A., Plarhtyr O., Tsyganov A., Stavinsky R.. Possibilities of improving the transformers and reactors on the basis of multiple counters of the rods *IEEE «International Conference on modern electrical and energy systems»*: 2017. P. 176 – 179.
7. Пат. 39631 Україна МПК НО1F27/28 ; НО1F27/30 ; НО1F27/32. Обмотка індукційного статичного пристрою / А. А. Ставинський, Р. А. Ставинський, О. М. Циганов – №u200809425 ; Заявл. 18.07.2008 ; Опубл. 10.03.2009. Бюл. № 5.
8. Белопольский И.И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности / И. И. Белопольский, Е. И. Каретникова, Л. Г. Пикалова. – М.: Альянс, 2013. – 400 с.
9. Пат. 121405 Україна, МПК (2017) НО1F27/28, НО1F27/30, НО1F27/32. Планарний магнітопровід індукційного статичного пристрою / Ставинський А.А., Ставинський Р.А., Циганов О.М. Циганова О.С. (Україна) – u200809425; заявл. 19.04.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. №5.
10. Levin M.I., Пентегов И.В., Рымар С.В., Lavreniuk A.V. Новые подходы при построении магнітопроводов силовых трансформаторов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. - №1. – с. 20-24.
11. Патент №136570 Україна, МПК (2019) НО1F27/24(2006.01). Магнітопровід трансформатора / Ставинський А.А., Авдеева О.А., Циганов О.М., Ставинський Р.А., Садовий О.С., Вахоніна Л.В. (Україна) – u 2019 02188; заявл. 04.03.2019; опубл. 27.08.2019, Бюл. №16.
12. Патент №136320 Україна, МПК (2019) НО1F27/24(2006.01). Спосіб виготовлення магнітопроводу індукційного статичного пристрою / Ставинський А.А., Авдеева О.А., Циганов О.М., Ставинський Р.А., Садовий О.С., Вахоніна Л.В. (Україна) – u 2019 02462; заявл. 13.03.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. №15.

СЕКЦІЯ 3. ІМПУЛЬСНІ ПРОЦЕСИ І ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.319.4

Гулько В.І., Дмитрішин О.Я., Фещук Т.А.

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСОЧЕНОГО КОМБІНОВАНОГО ПЛІВКОВОГО ДІЕЛЕКТРИКА ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ КОНДЕНСАТОРІВ

Використання в якості робочого діелектрика високовольтних імпульсних конденсаторів плівкових діелектричних структур дозволить поліпшити масо-габаритні характеристики конденсаторів і розширити їх експлуатаційні можливості [1-3].

Ця робота є логічним продовженням проведених раніше експериментальних досліджень характеристик комбінованого плівкового діелектрика [4].

У роботі [4] діелектричні структури досліджувалися без просочуючої рідини, для виключення фактора пробою в ній, як найменш електрично міцної складової, однак у реальних конденсаторів необхідно враховувати її наявність [5]. Для просочення плівкового діелектрика високовольтних імпульсних конденсаторів які експлуатуються у нормальних кліматичних умовах широко застосовується трансформаторне масло Т-1500 [1-3], але для просочення конденсаторів занурювальних електророзрядних комплексів інтенсифікації видобутку нафти і газу, що експлуатуються при температурах навколишнього середовища до 100 °С [6], повинні бути застосовані діелектричні рідини з більш високою межею робочої температури, наприклад, поліметилсилоксанова рідина типу ПМС-20, що допускає експлуатацію при температурах до 200 °С.

Метою даної роботи є порівняння електрофізичних характеристик різних комбінацій тришарового плівкового діелектрика при просоченні його трансформаторним маслом Т-1500 і поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20.

У конструкціях плівкового діелектрика змінювався процентний вміст (по товщині) полярної поліетилентерефталатної плівки (ПЕТ) і процентний вміст неполярної поліпропіленової плівки (ПП). Разом з тим, з метою дослідження впливу перерозподілу середньої напруженості електричного поля по компонентах діелектрика відповідно до їх відносної діелектричної проникності на короткочасну електричну міцність змінювалося взаємне розташування полярної й неполярної складової в структурі діелектрика при їх незмінному процентному співвідношенні.

Як критерії оцінки бралася зміна таких електрофізичних характеристик досліджуваних діелектричних структур як електричний опір ізоляції $R_{із}$ і короткочасна електрична міцність $E_{пр}$. При цьому також розглядався вплив на ці електрофізичні характеристики полярності обкладинки, що прилягає до полярної або неполярної складової плівкового діелектрика.

Структур з перевагою неполярної складової було обрано чотири варіанти:

- товщиною 30 мкм, що складається із двох шарів поліпропіленової плівки товщиною 10 мкм і одного шару поліетилентерефталатної плівки товщиною 10 мкм із, відповідно, 66,7 й 33,3% змістом неполярної й полярної складових;
- товщиною 34 мкм, що складається із двох шарів поліпропіленової плівки товщиною 12 мкм і одного шару поліетилентерефталатної плівки товщиною 10 мкм із, відповідно, 70,6 й 29,4% змістом неполярної й полярної складових;
- товщиною 35 мкм, що складається із двох шарів поліпропіленової плівки товщиною 10 мкм і одного шару поліетилентерефталатної плівки товщиною 15 мкм із, відповідно, 57,1 й 42,9% змістом неполярної й полярної складових;
- товщиною 39 мкм, що складається із двох шарів поліпропіленової плівки товщиною 12 мкм і одного шару поліетилентерефталатної плівки товщиною 15 мкм із, відповідно, 61,5 й 38,5% змістом неполярної й полярної складових.

Структур з перевагою полярної складової було обрано також чотири варіанти:

- товщиною 30 мкм, що складається із двох шарів поліетилентерефталатної плівки товщиною 10 мкм і одного шару поліпропіленової плівки товщиною 10 мкм із, відповідно, 66,7 й 33,3% змістом полярної й неполярної складових;
- товщиною 32 мкм, що складається із двох шарів поліетилентерефталатної плівки товщиною 10 мкм і одного шару поліпропіленової плівки товщиною 12 мкм із, відповідно, 62,5 й 37,5% змістом полярної й неполярної складових;

- товщиною 35 мкм, що складається із двох шарів поліетилентерефталатної плівки товщиною 10 мкм і 15 мкм і одного шару поліпропіленової плівки товщиною 10 мкм із, відповідно, 71,4 й 28,6% змістом полярної й неполярної складових;

- товщиною 40 мкм, що складається із двох шарів поліетилентерефталатної плівки товщиною 15 мкм і одного шару поліпропіленової плівки товщиною 10 мкм із, відповідно, 75 й 25% змістом полярної й неполярної складових.

Після просочення діелектричних структур з різними конструкціями плівкового діелектрика трансформаторним маслом Т-1500 і поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20, вимірявся електричний опір ізоляції і визначалася короточасна електрична міцність діелектрика шляхом доведення секцій до електричного пробоя відповідно до стандартної методики випробувань ГОСТ 27427-87, при цьому, кожне визначення електричної міцності проводилося на п'ятих зразках.

Аналіз результатів експериментальних досліджень різних структур плівкового діелектрика показав, що значення електричного опору й короточасної електричної міцності досліджуваних структур плівкового діелектрика, просочених трансформаторним маслом Т-1500 і поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20, близькі між собою.

У симетричних структурах ПП+ПЕТ+ПП і ПЕТ+ПП+ПЕТ величина середньоквадратичного відхилення при просоченні трансформаторним маслом Т-1500 становить від 0,2 до 0,89 кВ, у цих же структурах, але просочених поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20, від 0,24 до 1,07 кВ, а в несиметричних структурах ПП+ПП+ПЕТ і ПЕТ+ПЕТ+ПП ця різниця знижується й становить, відповідно, від 0,24 до 0,58 кВ і від 0,32 до 0,6 кВ.

Необхідно відзначити, що серед цих діелектричних структур найбільшу короточасну електричну міцність мають структури з перевагою полярної складової. Одночасно, для симетричних структур максимальна електрична міцність досягається при максимальному процентному вмісті неполярної складової. При просоченні трансформаторним маслом Т-1500 для структури ПП+ПЕТ+ПП товщиною 34 мкм – $E_{пр} = 605,9$ кВ/мм, а для структури ПЕТ+ПП+ПЕТ товщиною 32 мкм – $E_{пр} = 612,5$ кВ/мм. При просоченні поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20 для структури ПП+ПЕТ+ПП товщиною 34 мкм – $E_{пр} = 576,5$ кВ/мм, а для структури ПЕТ+ПП+ПЕТ товщиною 32 мкм – $E_{пр} = 587,5$ кВ/мм.

Разом з тим, як показують результати експериментальних досліджень, найбільша електрична міцність діелектрика досягається, коли обкладинка позитивної полярності прилягає до полярної поліетилентерефталатної плівки.

Висновки. 1. Для застосування в конструкціях високовольтних імпульсних конденсаторів можуть бути рекомендовані тришарові плівкові структури типу ПЕТ+ПП+ПЕТ і ПЕТ+ПЕТ+ПП, які мають найбільшу електричну міцність.

2. Так як значення електричної міцності в одних і тих самих структурах, просочених трансформаторним маслом Т-1500 і поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20 близькі, то вибір просочуючої рідини визначається температурою експлуатації.

3. Для конденсаторів, що експлуатуються із частотами проходження зарядів-розрядів від 0,1 Гц і вище рекомендовані структури з підвищеним змістом неполярної складової.

Список використаних джерел

1. Рудаков, В.В. Стан та тенденції розвитку високовольтних імпульсних конденсаторів [Текст] / В.В. Рудаков // Вісник НТУ «ХПІ». – 2009. – №39. – С. 146-154.
2. Ермилов, И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией [Текст] / И.В. Ермилов // Электричество. – 2006. – №9. – С. 73-79.
3. Гунько, В.И. Создание высоковольтных импульсных конденсаторов на основе комбинированного пленочного диэлектрика [Текст] / В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.А. Перекупка, С.О. Топоров // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 53-55.
4. Дмитришин, А.Я. Экспериментальное исследование характеристик комбинированного пленочного диэлектрика [Текст] / А.Я. Дмитришин, В.И. Гунько, С.О. Топоров // Материали ВНТК «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки» 6-7 квітня. 2017. – Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова – С. 62 - 63.
5. Fallou, B. Development of criteria for the selection of liquid dielectrics / B. Fallou, J. Samat, J. Perret, P. Vuarchex // CIGRE-86. – 1986. – Report 15-10. – P. 166-180.
6. Дмитришин, А.Я. Исследование тепловых режимов работы высоковольтных импульсных конденсаторов для погружных электроразрядных комплексов [Текст] / А.Я. Дмитришин, В.И. Гунько, С.О. Топоров, Е.Н. Слепец // Вісник НТУ «ХПІ» Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52. – С. 71-76.

УДК 621.319.4

Гулько В.І., Перекупка І.А., Танасова О.Д.

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИВАЛОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ
КОНДЕНСАТОРНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Основною тенденцією в області створення сучасних високовольтних імпульсних конденсаторів є використання плівкового діелектрика, що просочений неполярною діелектричною рідиною. Це пояснюється тим, що застосування плівкового діелектрика, на відміну від застосовуваних раніше паперового і комбінованого паперово-плівкового, дозволяє істотно знизити кількість шарів діелектрика до 2-5 проти 5-10 і, крім того, його тривала електрична міцність в 1,5-2,5 рази вище [1-3].

У роботах [4-6] проведені дослідження характеристик плівкових діелектриків на основі поліпропіленової плівки (ПП), а в [7, 8] - на основі поліетилентерефталатної плівки (ПЕТ). Але слід зазначити, що метою проведених досліджень не було прогнозування тривалої електричної міцності плівкового діелектрика в залежності від величини робочої напруженості електричного поля в діелектрику, а проводилися дослідження електрофізичних характеристик конкретних конструкцій діелектрика.

З точки зору проведених в ІІПТ НАН України досліджень найбільш перспективним є застосування в конструкції секцій високовольтних імпульсних конденсаторів комбінованого поліпропіленово-поліетилентерефталатного діелектрика з різним вмістом полярної і неполярної складових [9-12].

Метою роботи є оцінка можливості прогнозування очікуваного ресурсу (тривалої електричної міцності) високовольтних імпульсних конденсаторів з комбінованим поліпропіленово-поліетилентерефталатним діелектриком в залежності від величини робочої напруженості електричного поля в діелектрику.

Для досягнення поставленої мети були проведені експериментальні дослідження на макетах секцій з п'ятьма конструкціями комбінованого поліпропіленово-поліетилентерефталатного діелектрика товщиною 30, 34, 35, 39 і 55 мкм, що просочений трансформаторним маслом Т-1500. При цьому макети секції виготовлялися з тими ж параметрами, що і реальні секції конденсаторів. Для забезпечення однакової площі обкладок макети секцій намотувалися з однаковою кількістю робочих витків. При просочуванні макетів секцій була задіяна технологія, що застосовується при термовакуумній сушінні і просочення високовольтних імпульсних конденсаторів з плівковим діелектриком. У таблиці 1 представлена конструкція діелектричних систем, що досліджуються.

Таблиця 1. Конструкція діелектричних систем, що досліджуються

Номер варіанту системи	Товщина діелектрика, мкм	Конструкція системи	Відносний зміст плівки ПЕТ-КЕ, %
1	30	ПП 10 + ПЕТ-КЕ 10 + ПП 10	33,3
2	34	ПП 12 + ПЕТ-КЕ 10 + ПП 12	29,4
3	35	ПП 10 + ПЕТ-КЕ 15 + ПП 10	42,9
4	39	ПП 12 + ПЕТ-КЕ 15 + ПП 12	38,5
5	55	ПП 10 + ПЕТ-КЕ 10 + ПП 10+ + ПЕТ-КЕ 15 + ПП 10	45,5

В позначенні плівок: ПП - двосторонньо шорстка поліпропіленова плівка, ПЕТ-КЕ - поліетилентерефталатна плівка, а число, що стоїть при позначенні, - товщина шару плівки.

Для визначення тривалої електричної міцності (очікуваного ресурсу) були проведені дослідження макетів секцій в коливальному режимі розряду з близькими параметрами, при випробуваннях змінювалася тільки величина напруженості електричного поля для кожної з досліджуваних конструкцій діелектрика.

Проведені дослідження дозволили встановити залежність ресурсу плівкових діелектричних систем, що складаються з трьох і п'ятишарового поліпропіленові-поліетилентерефталатна діелектрика товщиною від 30 до 55 мкм, просоченого трансформаторним маслом Т-1500, від напруженості електричного поля в діелектрику. Отримані експериментальні дані дозволяють вибирати робочу напруженість електричного поля в діелектрику при створенні високовольтних імпульсних конденсаторів з необхідним ресурсом.

Залежно від ресурсу плівкових діелектричних систем необхідно вибирати таку робочу напруженість:

- 275-285 кВ / мм при заданому середньому ресурсі $3,5 \cdot 10^3$ зарядів-розрядів;
- 255-260 кВ / мм при заданому середньому ресурсі $1,5 \cdot 10^4$ зарядів-розрядів;
- 175-200 кВ / мм при заданому середньому ресурсі $2 \cdot 10^5$ зарядів-розрядів;
- 150-155 кВ / мм при заданому середньому ресурсі $3,5 \cdot 10^5$ зарядів-розрядів;
- 105-110 кВ / мм при заданому середньому ресурсі $2 \cdot 10^6$ зарядів-розрядів.

Висновок. При створенні високовольтних імпульсних конденсаторів на основі комбінованого поліпропіленові-поліетилентерефталатна діелектрика з товщиною від 30 до 55 мкм для досягнення необхідного ресурсу робочу напруженість електричного поля в діелектрику секцій конденсаторів необхідно вибирати, керуючись отриманими експериментальними даними.

Список використаних джерел

1. Кучинский, Г.С. Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых материалов / Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 310 с.
2. Кучинский, Г.С. Выбор допустимых рабочих напряженностей в силовых конденсаторах с пропиткой экологически безопасными диэлектриками [Текст] / Г.С. Кучинский, Л.Н. Галахова // Электричество. – 1999. – № 1. – С. 33-38.
3. Рудаков, В.В. Стан та тенденції розвитку високовольтних імпульсних конденсаторів [Текст] / В.В. Рудаков // Вісник НТУ „ХПІ”: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2009. – № 39. – С. 146–154.
4. Кравченко, Ю.В. Ресурс секций импульсных конденсаторов с полипропиленовой изоляцией: Фізика імпульсних розрядів у конденсованих середовищах: Матеріали XIII Міжнародної наукової конференції (21-25 серпня 2007). – Миколаїв: КП „Миколаївська обласна друкарня”, 2007. – С.138-139.
5. Бутко, М.В. Электрические характеристики изоляции импульсных конденсаторов, включающих слои полипропиленовой пленки толщиной 40 мкм [Текст] / М.В. Бутко, С.М. Бутко, О.Ю. Дубийчук, В.В. Рудаков, С.Н. Свиридок // Вісник НТУ „ХПІ”: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2011. – № 49. – С. 47-53.
6. Рудаков, В.В. Высоковольтный импульсный конденсатор с ограниченным ресурсом [Текст] / В.В. Рудаков, В.П. Кравченко, О.Ю. Дубийчук // Вісник НТУ „ХПІ”: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52. – С. 154-160.
7. Ермилов, И.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы с полимерной изоляцией [Текст] / И.В. Ермилов // Электричество. – 2006. – № 9. – С. 73-79.
8. Рудаков, В.В. Удельная энергия высоковольтных импульсных конденсаторов с лавсановым диэлектриком [Текст] / В.В. Рудаков, В.П. Касаткин // Вісник НТУ „ХПІ”: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2012. – № 21. – С. 233-237.
9. Гребенников, И.Ю. О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов. [Текст] / И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, Швеи И.С. // Электротехника. – 2005. – № 12. – С. 47-51.
10. Гунько, В.И. Исследование конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов [Текст] / В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, С.О. Топоров, Т.А. Фещук // Электронная обработка материалов. – 2012. – № 2. – С. 93-96.
11. Гунько, В.И. Разработка высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком [Текст] / В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, С.О. Топоров, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, С.О. Топоров, И.А. Перекупка // Вісник НТУ „ХПІ”: зб. наук. пр.: Тем. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52. – С. 65-71.
12. Онищенко Л.И., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Перекупка И.А. Создание серии высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком на базе одного изоляционного корпуса: Фізика імпульсних розрядів у конденсованих середовищах: Матеріали XVI Міжнародної наукової конференції (19-22 серпня 2013). – Миколаїв: КП „Миколаївська обласна друкарня”, 2013. – С.200-203.

УДК 537.528:542.22

*Рачков О.М., Дмитрішин О.Я., Старков І.М.**Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв*

ПОДРІБНЕННЯ СКЛОПОДІБНОЇ СИРОВИНИ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНИМ СПОСОБОМ

В сучасному світі задачі енерго- та ресурсозбереження є одними з актуальних. В умовах помірного клімату розробка ефективних, екологічно безпечних, вогне- і вологостійких, легких і з тривалим терміном експлуатації теплоізоляційних матеріалів є однією з таких задач. В Україні сьогодні для теплоізоляції в основному використовують пінополістирол (пінопласт), який має порівняно невеликий термін служби (20-30 років), схильний до поглинання води, розкладається під дією сонячної радіації і впливом грибків, є невогненестійким і при горінні виділяє токсичні речовини. З цих причин в США, Канаді та країнах ЄС цей матеріал вже забороняють використовувати для теплоізоляції будівель. Власного виробництва альтернативних, більш ефективних, а головне, більш безпечних теплоізоляційних матеріалів в Україні поки що немає. Рішенням проблеми безпечної теплоізоляції може бути використання натуральних (мінеральних) композиційних матеріалів з піноскла, які при рівних з пінопластом значеннях теплопровідності мають ряд конкурентних переваг: вони негорючі, характеризуються високою вологостійкістю, морозостійкістю, мають термін придатності не менше 100 років, виготовлені з екологічно чистої сировини.

Процес виготовлення піноскла, який засновано на високодисперсному помелу склобою, усуває потребу у вихідній сировині, соді і енергоносіях на варіння скла. Найбільш поширеним способом є застосування багатостадійного подрібнення в механічних дробарках і млинах з додаванням спеціальних добавок, що впливають на властивості і кінцеві показники твердих компонентів піноскляної суміші [1-3]. Використання таких способів подрібнення залишається досить складним, не дозволяє досягти мікронних розмірів, а піноскло - погано піниється, містить теплопровідні домішки металу і є дорогим через використання вспінюючих добавок [4]. Також від фракційного складу наповнювачів, дисперсності твердої фази безпосередньо залежать характеристики щільності, теплопровідності, міцності отриманого теплоізоляційного матеріалу (піноскляного щебеню, або піноскляних блоків) [5]. Істотне значення також має вологонасичення твердої скляної компоненти, підвищення якої покращує реологічні властивості рідко-скляної суміші [6], має значення, зокрема, для виготовлення продукції складного профілю. Високе вологонасичення твердої фази є необхідною умовою, що визначає як можливість створення легкого піноскла зі склобою, так і економію на рідкому склі (компонента, яку необхідно купувати, або витратити цінні ресурси на власне виробництво).

Розрядно-імпульсне подрібнення має набагато більший потенціал, ніж традиційне подрібнення скляного матеріалу в кульових або стрижневих млинах сухого або мокрого помелу. Дана технологія дозволяє при відсутності пилу отримувати продукт із заданим фракційним складом, забезпечуючи необхідні реологічні властивості рідко-скляної суміші, мінімізацію відходів та забруднення апаратним металом, значне зменшення капітальних та енергетичних витрат при незначних габаритах устаткування [7, 8].

Таким чином, розрядно-імпульсна обробка, яка найкращим чином відповідає вимогам, що пред'являються і до самого процесу дезінтеграції, і до характеристик вихідного матеріалу, може стати технологічним ядром процесу отримання піноскла з низькою щільністю, теплопровідністю і вартістю, і при цьому з досить високою для використання в якості теплоізоляційного матеріалу міцністю.

Метою роботи є експериментальна оцінка можливості подрібнення склоподібної сировини з регламентованим фракційним складом і значенням вологонасичення розрядно-імпульсним способом.

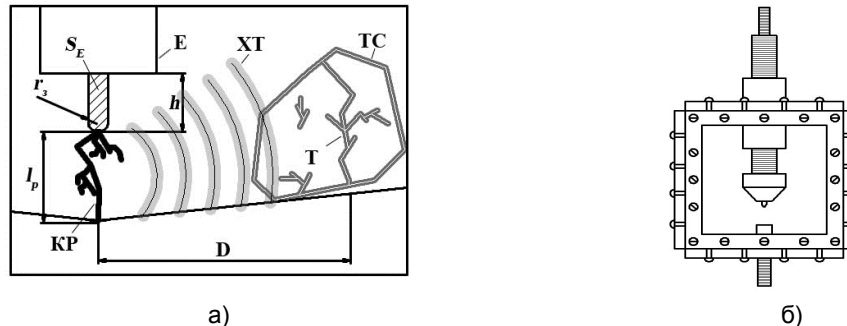
В ролі сировини було обрано тарне скло. Використання вторинної сировини в даному питанні вирішує кілька дуже важливих проблем одночасно:

- економія енергії, так як склобій виплавляється при набагато меншій температурі, ніж звичайна сировина;
- скорочення викидів вуглекислого газу в атмосферу на виробництві (кожна тонна використаного склобою зменшує викиди на 500 кг);
- зменшення споживання природних ресурсів, оскільки склобій фактично заміняє сировину при виробництві скла;
- зменшення відходів від виробництва пакувальних матеріалів на сміттєзвалищах.

Інструментом впливу на речовину при електричному розряді можуть бути: ударні хвилі; високошвидкісні струмені рідини, в тому числі, що мають кавітаційний генезис; акустичне випромінювання; термічний удар; великий струм розряду через середу – об'єкт обробки; електромагнітне випромінювання.

Характерна ознака електричного розряду в рідині – вибухоподібне перетворення електричної енергії в інші види енергії протягом від 1 мкс до 100 мкс [9]. Тому методи обробки матеріалів з використанням електричного розряду (ЕР) в рідині обґрунтовано відносяться до класу імпульсних. За рахунок обмеженого обсягу каналу розряду щільність енергії в ньому досягає від 10 до 100 кДж/см³, при цьому речовина

розігрівається до температури від $40 \cdot 10^3$ К до $50 \cdot 10^3$ К, а тиск досягає від $2 \cdot 10^2$ МПа до $2 \cdot 10^3$ МПа. В результаті цього ЕР генерує в навколишнє середовище хвилі стиснення, потужне електромагнітне випромінювання, комплекс кавітаційних явищ (від мікро- до макрокавітаційних каверн і розривів на твердих поверхнях), потужне акустичне поле. Кожен з перерахованих факторів виконує роботу над середовищем і речовиною, дозволяючи отримати технологічний ефект. Саме ці фактори ЕР покладено в основу електророзрядних методів обробки матеріалів. Схема впливу хвилі тиску на тарне скло представлена на рисунку 1а. Для проведення експериментальних досліджень було обрано типову схему з розрядною камерою закритого типу, що приведена на рисунку 1б.



а) б)
КР – канал розряду; ХТ – хвиля тиску; ТС – тарне скло; D – зона руйнування прилегла до КР; Е – електрод; Т – тріщини, що утворюються в склі; S_E – площа стрижня, що змочується; h – виступаюча частина стрижня; r_3 – радіус закруглення; l_p – відстань між анодом і катодом

Рисунок 1 – Схема впливу хвилі тиску на тарне скло (а) та розрядна камера з електродною системою (б).

Проведено розрахунок параметрів хвилі стиснення на різних відстанях від каналу розряду, спочатку для заданих параметрів розрядного контуру ($U = 50$ кВ, $C = 0,1$ мкФ, $L = 6$ мкГн). На підставі зіставлення фізико-механічних властивостей скла і результатів проведених розрахунків було визначено максимальну відстань, на якій хвиля стиснення здійснює руйнівний вплив ($r = 0,1$ м).

За параметрами розрядного контуру і практично досяжною за умовами роботи комутатора частоти вибрано необхідні для розрядно-імпульсного подрібнення характеристики енерговузла (в першу чергу, корисну потужність) для подрібнення тарного скла до мікронних розмірів [10].

Для оцінки можливостей (в першу чергу, за дисперсією) розрядно-імпульсного подрібнення тарного скла отримано результати попередніх обробок, проведених для заданих параметрів контуру в камері, що забезпечує необхідний максимальний радіус руйнування в чистій воді та в воді з додаванням поверхнево-активних речовин (ПАР).

Розглянуті особливості для розрахованих режимів дозволили визначити найбільш ефективний режим обробки та відповідні сукупності початкових умов, за яких спостерігається найбільший вихід найменшої (менше 40 мкм) фракції скляного порошку та інших менших фракцій, а саме: $U = 30$ кВ, $C = 0,25$ мкФ, $l_p = 1,8$ см, з питомою енергією $w = 260$ Дж/г.

Аналіз гранулометричного складу дисперсії показав можливість подрібнення скла до мікронної фракції. Вміст різних фракцій скла:

- отриманих розрядною обробкою у воді: 5 мкм – 20 %, 300 мкм – 40 %, 600 мкм – 40 %;
- отриманих розрядною обробкою у воді з додаванням ПАР: від 4 мкм до 6 мкм – 30 %, від 14 мкм до 20 мкм – 50 %, від 500 мкм до 700 мкм – 10 %.

Аналіз пористості та вологонасичення для різних фракцій скляних порошків показав, що при зменшенні розміру фракції збільшується пористість порошку до 70 %, а вологонасичення – до 80 %.

Таким чином можна зробити **висновок**, що спосіб подрібнення, що пропонується, є перспективним і потребує подальших досліджень в сенсі використання в промислових масштабах.

Список використаних джерел

1. Пат. РФ № 2459769, МПК 7 C03C7/00, C03B 19/08. Способ получения пеностекла [Текст] / Зайцев М.П., Лоскутов В.И.; заявитель и патентообладатель Зайцев М.П., Лоскутов В.И. – № 2010139445/03; заявл. 24.09.10; опубл. 27.08.12, Бюл. № 3.
2. Пат. СССР № 1452803, МПК 7 C03C 11/00. Способ получения пеностекла [Текст] / Димидович Б.К., Садченко Н.П., Шипук П.В., Кирик Л.А., Библикин Л.А., Красько К.Ф.; заявитель и патентообладатель Минский исследовательский институт строительных материалов. – №1206243; заявл. 30.06.87; опубл. 23.01.89, Бюл. № 3.
3. Курец, В.И. Электроимпульсная дезинтеграция материалов / В.И. Курец, А.Ф. Усов, В.А. Цукерман. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с.
4. Ходаков, Г.С. Физика измельчения / Г.С. Ходаков. – Москва: Наука, 1972. – 308 с.

5. Ходаков, Г.С. Влияние тонкого измельчения на физико-химические свойства твердых тел [Текст] / Г.С. Ходаков // Успехи химии. – 1963. – № 32:7. – С. 860 – 881.
6. Скороход, В.В. Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых материалов / В.В. Скороход, Ю.М. Солонин, И.В. Уварова. – Киев: Наук.думка, 1990. – 248 с.
7. Меерсон, Г.А. Электроимпульсный способ получения порошков металлов и сплавов [Текст] / Г.А. Меерсон, Г.А. Кассир, Е.М. Темников // Порошковая металлургия. – 1975. – № 2. – С. 9 – 15.
8. Малюшевский, П.П. Особенности измельчения твёрдых и сверхтвёрдых материалов при электровзрывном воздействии [Текст] / П.П. Малюшевский, Г.Г. Горовенко Л.П. Волкова // Электрогидравлический эффект и его применение. – 1981. – С. 134 – 139.
9. Гулый, Г.А. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах / Г.А. Гулый, П.П. Малюшевский. – Киев: Наук. думка, 1977. – 176 с.
10. Щерба, А.А. Влияние параметров электрических разрядов на динамику искроразрядных каналов при объемной электроискровой обработке плоского слоя токопроводящих гранул [Текст] / А.А. Щерба, С.В. Петриченко // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч.3. – С. 61 – 65.

УДК 681.52:537.528:544.5

Вовченко А. И., д.т.н., чл.-корр. НАН Украины; Козырев С. С., к.т.н.; Овчинникова Л. Е., к.т.н.
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев;
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КООРДИНАТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ

Высокопроизводительные технологические процессы с использованием взрывного преобразования энергии широко применяются в различных отраслях промышленности. Для разрядноимпульсных технологий (РИТ) разрушения природных и искусственных негабаритов, рыхления прочных донных грунтов требуется длительный импульс давления с большой энергией [1, 2, 3]. В таких технологиях используют высоковольтный электрический разряд в химически активных конденсированных средах, способных к экзотермическим преобразованиям в режиме взрывного горения под действием высоких температур и давлений, создаваемых в канале разряда. Такое комплексное физико-химическое явление принято называть высоковольтным электрохимическим взрывом (ВЭХВ). Высвобождающаяся энергия при экзотермических преобразованиях суммируется с электрической энергией разряда, накопленной на обкладках конденсаторных батарей. В результате такого суммирования энергия разрушения возрастает в несколько раз без увеличения запасенной энергии в батарее конденсаторов, а, следовательно, без увеличения количества конденсаторов и габаритов оборудования [4].

Важным преимуществом РИТ, использующих высоковольтный электрохимический взрыв для разрушения негабаритов, является их управляемость, в отличие от технологий, использующих взрывчатые вещества. Поэтому разработка систем управления разрядноимпульсными установками для обеспечения необходимых технологических режимов электрохимического взрыва является актуальной задачей. Один из методов управления разрядным процессом представляет собой изменение параметров генератора импульсных токов (ГИТ) и длины межэлектродного промежутка [5]. Однако в этом случае выбор значений регулируемых величин осуществляется до начала ввода энергии, поэтому регулирование невозможно в процессе разряда, а осуществляется только дискретное управление от разряда к разряду. Для обеспечения более полного сгорания экзотермической смеси (ЭС) необходимо обеспечить управление режимом ввода энергии в процессе разряда путем реализации многоимпульсного ввода энергии с целью получения волн давления необходимой формы. С этой целью используются многоконтурные ГИТ в составе разрядноимпульсных установок [6, 7]. Емкостные накопители каждого контура ГИТ могут иметь разные емкости и заряжаться до различного напряжения.

Задачей системы управления при многоимпульсном вводе энергии является обеспечение подачи очередного разрядного импульса в момент достижения давлением в канале разряда минимального граничного значения, необходимого для самоподдерживающейся экзотермической реакции $P_{\min}=23$ МПа. Это обеспечит более полное сгорание экзотермической смеси и максимальную эффективность экзотермического преобразования энергии.

Давление в канале разряда имеет значительный статистический разброс и является операционно не определяемым, поэтому не может быть использовано в качестве информационной координаты в системе управления. В связи с этим необходимо проведение исследований с целью определения информационных координат, служащих косвенной оценкой давления в канале разряда. Поскольку электродинамические и

гидродинамические процессы при ВЭХВ носят стохастический характер то необходимо оперировать вероятностными показателями случайных величин, характеризующих эти процессы. К таким величинам относятся напряжение пробоя $U(t)$, разрядный ток $I(t)$, электрическая мощность $N(t)$, а также давление в волне сжатия $P(t)$. Существует ряд исследований, показывающих, что эти характеристики подчиняются нормальному закону распределения [5]. С целью установления связи между электродинамическими $U(t)$, $I(t)$, $N(t)$ и гидродинамическими $P(t)$ характеристиками ВЭХВ проведен их корреляционный анализ. Так как исследуемые величины распределены нормально, то для проведения корреляционного анализа применялся линейный коэффициент корреляции Пирсона r , который используется для оценки линейной связи, и коэффициент детерминации $R=r^2$, который характеризует плотность связи. Корреляционный анализ проводился для различных комбинаций электродинамических $U(t)$, $I(t)$, $N(t)$ и гидродинамических $P(t)$ величин. Результаты расчётов r и R представлены в табл. № 1.

Таблица № 1

Результаты корреляционного анализа

Комбинации исследуемых величин	r	R
$P - I$	0,8602	0,7399
$P - U$	0,9458	0,8945
$P - N$	0,9679	0,9368

Полученные коэффициенты детерминации R между электродинамическими и гидродинамическими характеристиками подтверждают наличие достаточно плотной связи между ними, несмотря на стохастичность этих процессов. Таким образом, в качестве информационных координат, косвенно определяющих давление в канале разряда, могут быть использованы операционно определяемые электродинамические характеристики $U(t)$, $I(t)$, $N(t)=U(t) \cdot I(t)$. Наиболее плотная информационная связь наблюдается между $P(t)$ и $N(t)$. Зависимость между $P(t)$ и $N(t)$, предварительно экспериментально установленная для конкретного технологического процесса, может храниться в базе данных системы управления и использоваться в процессе реализации алгоритма управления разрядноимпульсной установкой. Или оперативно вычисляться по выражениям (1), (2), предложенным в [8]:

$$\frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{d(P \cdot \pi \cdot a^2)}{dt} + P \cdot \frac{d(\pi \cdot a^2)}{dt} = \frac{N}{l}, \quad (1)$$

$$P = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d^2(\pi \cdot a^2)}{dt^2} \cdot \ln\left(\frac{l}{a}\right) - \frac{\rho}{8 \cdot \pi \cdot (\pi \cdot a^2)} \cdot \left(\frac{d(\pi \cdot a^2)}{dt}\right)^2, \quad (2)$$

где P – давление в канале разряда, a – радиус канала разряда, l – длина разрядного промежутка, γ – эффективный показатель адиабаты, ρ – плотность среды, $N(t)=U(t) \cdot I(t)$.

Использование $N(t)=U(t) \cdot I(t)$ в качестве информационной координаты позволяет с достаточной степенью точности получать оценку давления в канале разряда $P(t)$ для своевременной подачи управляющего сигнала, что обеспечивает протекание экзотермической реакции в самоподдерживающемся режиме до полного сгорания экзотермической смеси.

Выводы. Исследования взаимосвязи электродинамических и гидродинамических характеристик высоковольтного электрохимического взрыва и их статистический анализ показали существенную стохастичность процессов при экзотермических преобразованиях в режиме взрывного горения. Стохастичность процессов объясняет не эффективность использования систем управления, регулирующих только начальные условия электрохимического взрыва. Обоснована необходимость текущего управления в процессе экзотермических преобразований с целью недопущения снижения давления в канале разряда ниже допустимого, поддерживающего экзотермическую реакцию взрывного горения.

Проведенный корреляционный анализ взаимосвязи текущего давления в канале разряда и электродинамических параметров разряда, характеризующих режим ввода электрической энергии, показал наличие достаточно плотной информационной взаимосвязи между ними, несмотря на стохастичность процессов. Таким образом, в качестве информационных координат в системе управления ВЭХВ, косвенно определяющих давление в канале разряда $P(t)$, могут быть использованы операционно определяемые электрические характеристики разряда $U(t)$, $I(t)$, $N(t)=U(t) \cdot I(t)$, что позволит реализовать текущее управление режимом ввода энергии в процессе разряда. Это увеличит время протекания экзотермической реакции в самоподдерживающемся режиме в каждой реализации ВЭХВ до полного сгорания экзотермической смеси. За счет этого уменьшаются непроизводительные потери экзотермической смеси, химической и

электрической энергии при каждой реализации высоковольтного электрохимического взрыва, и увеличивается количество выделенной суммарной энергии, без увеличения затрат электроэнергии.

Литература

1. Rizun A. R., Golen' Yu. V., Denisyuk T. D. Seismically safe distances for bottom ground loosening by high-voltage electrochemical explosion. Surface Engineering and Applied Electrochemistrv. 2008. Vol. 44, Issue 3. P. 240–242.
2. Рытов С. А. Эффективность применения электроразрядных технологий для устройства геотехнических конструкций. Жилищное строительство. 2010. № 5. С. 47–50.
3. Rizun A. R., Golen' Yu. V., Denisyuk T. D. Initiation of electrical discharge by exothermal compositions at destruction of firm soils. Surface Engineering and Applied Electrochemistrv. 2007. Vol. 43, Issue 2. P. 116–118.
4. Вовченко А. И., Посохов А. А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. К.: Наук. думка, 1992. 168 с.
5. Sergey Kozyrev Control System of Discharge-Pulse Installation with Elements of Artificial Intelligence. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON 2019. – Proceedings 8879816, P. 513–517.
6. Тертилов Р. В. Оптимизация разрядноимпульсных технологий на базе применения двухконтурных генераторов импульсных токов. Технічна електродинаміка. 2011. № 3. С. 67–72.
7. Блащенко А. Д., Половинка В. Д., Тертилов Р. В. Двухконтурный генератор импульсных токов с регулируемым включением контуров. Электронная обработка материалов. 2013. 49(1). С. 97–101.
8. Гулый Г. А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. К.: Наук. думка, 1990. 208 с.

УДК 537.868

Колесник І.А., Рябенкий В.М., д.т.н.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

СПЕКАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Глобальной задачей исследователей, работающих в области порошковой металлургии, является поиск методов, целью которых является уменьшение длительности процесса спекания. Для достижения данной цели создаются различные методы по уменьшению длительности зарастания (залечивания) пор, что, соответственно, приведёт к сокращению времени спекания.

Прежде чем перейти к основной идее данной работы необходимо вспомнить о классической модели спекания. Хорошо известно, что в обычных условиях электромагнитное поле проникает вглубь металла и локализуется в тонком слое вблизи его поверхности. Это явление называется скин-эффектом. Оно обусловлено большой электропроводностью металлических тел: внешняя волна индуцирует в металле высокочастотный электрический ток, препятствующий проникновению поля в образец. Скин-эффект характеризуется глубиной проникновения и законом распределения поля в проводнике. При классическом (или нормальном) скин-эффекте, имеющей место в области комнатных температур, поле убывает по экспоненциальному закону. Глубиной проникновения (толщиной скин-слоя) обычно называют расстояние δ , на котором поле убывает в e раз. Иными словами, электроны проводимости (свободные электроны) в металлической заготовке локализируются исключительно в приповерхностном тонком слое и не способны передать свою электромагнитную энергию вглубь заготовки. Тепло, которое образуется в скин-слое в результате поглощения электронами электромагнитного поля, передается внутрь металла путем теплопроводности.

Целью данной работы является построение математической модели ускоренного массопереноса при спекании металлических порошков за счёт одновременного воздействия высокочастотного нагрева (в диапазоне дальнего инфракрасного и ультрафиолетового излучения) и постоянного магнитного поля.

В настоящее время существует устоявшаяся математическая модель транспорта диффундирующих частиц [1,2]. В общем виде она выражается следующим равенством:

$$\sum J = -D \cdot \left(\nabla n + \frac{nF}{kT} \right) \left[\frac{1}{m^2 \cdot c} \right], \quad (1)$$

где $\sum J$ - суммарный поток диффундирующих частиц, D - коэффициент диффузии, ∇n - градиент концентрации, k - постоянная Больцмана, n - концентрация диффузанта, F - движущая сила диффузии, обусловленная воздействием тепловых, механических и электрических полей.

При спекании порошковых материалов действуют все 3 указанные поля. Однако, тепловая J_T (термодиффузионная) и механическая J_L составляющие являются основными, а электрической можно пренебречь. В данном случае выражение (1) будет иметь вид:

$$\sum J = J_T + J_L = -D \cdot n \cdot \left(\frac{Q_T \cdot \nabla T}{kT^2} + \frac{8\pi\alpha}{kT \cdot S} \right). \quad (2)$$

В формуле (2) имеем: где n и D - концентрация диффундирующих атомов и коэффициент диффузии, T - температура нагрева, α - поверхностная энергия на границе "порошинка" - пора, S - площадь сферической поверхности поры, Q_T - теплота переноса атомных частиц. ∇T - градиент температуры в толще спекаемой заготовки. Для ионных соединений $Q_T \approx 1 \text{ эВ}$.

Зная поток диффундирующих частиц $\sum J$ можно с легкостью найти время полного зарастания поры.

$$t_n = \frac{N_n}{\sum J \cdot S_n} [c], \quad (3)$$

где S_n - площадь поверхности поры,

N_n - необходимое количество атомов для заполнения поры ($N_n = \frac{4\pi \cdot d_n^3}{3 \cdot a}$).

Стоит отметить, что средние величины длительности процесса спекания и зарастания пор сильно разнятся (на несколько порядков). Зачастую процесс спекания завершается на одной из первых стадий – образование металлического каркаса, т.е. создание между частицами перемычек («мостиков»). Возникновение данных перемычек обязаны диффузионному сближению частиц и, следовательно, затягиванию пустот между ними. Можно сделать вывод, что длительность процесс спекания прямопропорционально связана с длительностью зарастания пор.

Поиск методов ускорения процесса спекания привёл к рассмотрению действия силы Лоренца и воздействия внешнего электромагнитного излучения на электрон. Перейдём к рассмотрению спекания металлических спрессованных заготовок из порошкового железа с помощью высокочастотного излучения в диапазоне частот $\nu = 10^{14} - 10^{15} \text{ Гц}$ и одновременным присутствием постоянного магнитного поля B с величиной не менее 0.5 Тл . Стоим отметить, что при частоте $\nu > 10^{15} \text{ Гц}$ описываемый эффект только усилится. Однако, данная величина соответствует жесткому ультрафиолетовому излучению, рентген – излучению, которые не безопасны для человеческого здоровья.

Суть данного эффекта состоит в том, что в постоянном магнитном поле носители заряда движутся по спиралям, оси которых направлены вдоль магнитного поля (рис.2.а.). Электрическое поле внешнего источника излучения подталкивает электрон в направлении вектора напряженности вглубь спекаемого вещества. При высоких частотах скин-слой имеет незначительную глубину. При вращении электрон, попадая в этот скин-слой, поглощает импульсы энергии от внешнего электромагнитного поля и перемещаясь вглубь металла, подталкивает его атомы в имеющиеся вакансии (в пору).

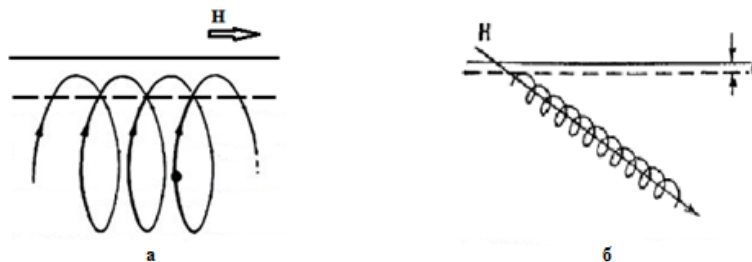


Рис. 2. – Движение электрона в постоянном магнитном поле, параллельном поверхности металла (а) и движение электрона в магнитном поле, наклонном к поверхности металла (б)

Поведение свободного электрона при поглощении энергии высокочастотного поля падающей электромагнитной волны, сильно зависит от ориентации постоянного магнитного поля по отношению к поверхности металла. При строго параллельном направлении магнитного поля по отношению к поверхности, свободные электроны, вращаясь по окружности, многократно возвращаются в скин-слой (аналог - зазор в циклотроне) и поглощают очередную порцию энергии. Происходит, так называемый циклотронный резонанс (ЦР), связанный с многократным возвращением эффективных электронов в скин-слой[3]. При больших углах

наклона вектора $\mathbf{H}$ к поверхности металла большинство электронов попадает в скин-слой только один раз, после чего он уходит в глубину металла и рассеивается на фононах, искажениях решетки и примесях (рис.2.б.).

В реальных условиях, картина распределения постоянного магнитного поля внутри металла представляет концентрические линии. Поэтому движение электронов в металле ориентированы по разным направлениям относительно поверхности: одновременно в параллельном и наклонном полях постоянного магнитного поля. Часть электронов, вращаясь по замкнутой траектории, поглощает энергию в скин-слое многократно, другая часть, получив энергию одноразово, уходит вглубь металла и там рассеивается, передавая энергию атомам металла. Так как постоянное магнитное поле обычно имеет концентрический характер, то траектории движения электронов будут иметь разные направления. Разнонаправленные потоки электронов обеспечат равномерный массоперенос в объеме.

Осуществление данного эффекта реализуемо лишь при температурах ниже точки Кюри. Это связано с потерей ферромагнитных свойств металлов и превращение их в парамагнитные. Например, для железа (Fe) точка Кюри равна 1043K. Сравнивая данную величину со средними величинами температуры при спекании в муфельной печи ($T=1500K$), можно сделать вывод, что величина термодиффузионной составляющей, в данном случае, будет невелика (на несколько порядков ниже).

При соблюдении всех перечисленных условий возникает дополнительная диффузионная составляющая, связанная с атомно – электронным взаимодействием, которую обозначим $J_{A.Э.}$. В исследованиях диффузии в металлических средах при воздействии импульсных токов Самарского государственного технического университета эта движущая сила диффузии получила название «электронного ветра»[4].

Нахождение величины $J_{A.Э.}$ возможно путем рассмотрения физики процесса передачи высокочастотной энергии при данной модели спекания.

Основное значение при массопереносе играет процесс рассеяния электронов на тепловых колебаниях кристаллической решетки (на фононах). Каждый атом решетки совершает беспорядочные колебания около положения равновесия, оставаясь в пределах сферы с радиусом, равным амплитуде колебаний. Обозначим этот радиусом буквой r . Тогда площадь поперечного сечения этой сферы $S = \pi r^2$ можно считать сечением рассеяния колеблющегося атома. Вероятность попадания электрона в это сечение будет очевидно прямо пропорциональна площади сечения. При своем движении электрон, попадая в это сечение колеблющегося атома рассеивается, передавая свою энергию атому кристаллической решетки. Атом, получив импульс энергии, начинает диффундировать в свободные поры вещества. Согласно уравнению Ньютона, атом получит полный импульс F_a :

$$F_a = C_F \cdot m_e \cdot S \cdot v^2 [H], \quad (4)$$

здесь F_a - импульс энергии, получаемый атомом, C_F - концентрация электронов в потоке, m_e - масса электрона, S - площадь рассеяния атома, v - скорость потока электронов проводимости.

Несмотря на огромное количество свободных электронов в металле, располагаются они по энергетическим уровням потенциальной ямы в строгом порядке. Проводимость связана с возможностью перехода электронов на более высокие энергетические уровни, то есть определяется возможностью получения электронами ускорения во внешнем электрическом поле. В металлах при $T > 0$ такая возможность имеется только у электронов, находящихся в области размытия функции распределения, так как реальные электрические поля не в состоянии вырвать электроны из глубины потенциальной ямы и перевести их на свободные уровни, энергия которых выше уровня Ферми W_F (перейти же на соседние, более высоко расположенные уровни глубинные электроны не могут, потому что все эти уровни заняты). Величину энергии Ферми E_F можно найти через общую концентрацию электронов n .

Концентрацию электронов проводимости с энергией Ферми (C_F) из общего количества свободных электронов (C_0), участвующих в создании движущей силы диффузии атомов, можно определить из соотношения:

$$C_F = C_0 \frac{T_c}{T_F} \left[\frac{1}{M^3} \right], \quad (5)$$

здесь T_c – температура изотермической выдержки (область точки Кюри), T_F - температура Ферми для Fe.

На высоких частотах $\nu = 10^{14} - 10^{15} \text{ Гц}$ квант энергии, поглощаемый атомом достаточно велик $E_T = 4 - 5 \text{ эВ}$ [5], поэтому электроны начинают перемещаться на более высокие энергетические уровни.

Далее можем определить начальную скорость электронов, которая будет равна

$$v_F = \sqrt{\frac{2E_T}{m_e}} \left[\frac{M}{c} \right]. \quad (6)$$

Електрон, двигаясь по круговой орбите с радиусом r_L , способен накапливать энергию и получать ускорение движения только лишь пребывая в скин-слое толщиной δ , т.е. на небольшой дуге АВ (рис.3). Длина данной дуги может быть найдена из следующего выражения

$$l_{AB} = \sqrt{r_L \cdot \delta} \quad [M]. \quad (7)$$

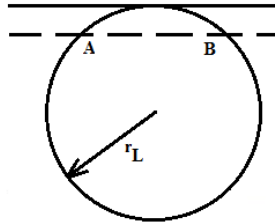


Рис. 3. Орбита вращения электрона проводимости

Значение величины толщины скин - слоя - δ определяется формулой:

$$\delta = \left(\frac{c^2 \cdot m_e \cdot v_F}{2\pi\alpha \cdot e^2 \cdot C_F \cdot \omega} \right)^{\frac{1}{3}} [M]. \quad (8)$$

Ларморовский радиус вращения электрона зависит от напряженности постоянного магнитного поля - B [Тл]:

$$r_L = \frac{m_e \cdot v_F}{eB} [M]. \quad (9)$$

Имея длину дуги l_{AB} и начальная скорость движения электрона v_F определим промежуток времени, проведенного электроном в скин-слое. В течении данного времени t_δ электрон получит определенное количество импульсов энергии от электрического поля, которое можно найти зная период колебаний электромагнитного излучения. Зная частоту колебаний можно с легкостью найти период и, соответственно, найти количество импульсов энергии Z .

$$Z = \frac{t_\delta}{T} [c]. \quad (10)$$

При движении электрона с зарядом e в электромагнитном поле на него будут действовать и электрическое, и магнитное поле, а полная сила есть векторная сумма сил со стороны первого и второго:

$$F = F_e + F_m = eEZ + Bev_F [H], \quad (11)$$

где F_m - сила, действующая со стороны постоянного магнитного поля, F_e - сила, действующая со стороны электрического поля, B – магнитная индукция постоянного магнита, v_F - начальная скорость движения электрона. Согласно второму закону Ньютона:

$$F = m_e \cdot a, \quad (12)$$

где a - ускорение электрона

Зная напряженность электрического поля E , можно найти силу воздействия импульсов энергии Z на электрон.

$$F_e = eEZ. \quad (13)$$

При расчете силы Лоренца, не учитывается фактор намагничивания ферромагнитного материала, которое создает собственное магнитное поле. Индукция этого поля намного меньше индукции постоянного магнита, поэтому в расчетах ее не учитываем. Сила воздействия на электрон со стороны постоянного магнитного поля:

$$F_m = Bev_F. \quad (14)$$

Тогда общая сила, воздействующая на электрон, будет равна:

$$\sum F = F_s + F_m. \quad (15)$$

Теперь из выражения можно найти ускорение потока электронов:

$$a = \frac{\sum F}{m_s} \left[\frac{M}{c^2} \right]. \quad (16)$$

Конечная скорость электрона, покидающего скин-слой металла будет равна:

$$v = v_F + at_\delta \left[\frac{M}{c} \right]. \quad (17)$$

где t_δ – время пребывания электрона проводимости в скин-слое,

v_F - начальная скорость движения электрона.

Имея значения концентрации электронов, общую скорость потока электронов в любой момент времени, площадь рассеяния электронов, можно по уравнению найти полный импульс движущих сил электронного потока на атом вещества - F_a .

$$F_a = C_F \cdot m_s \cdot S \cdot v^2. \quad (18)$$

Площадь рассеяния атома в области высоких температур определяется амплитудой колебания атома χ .

$$\chi = \sqrt{\frac{\hbar}{m_{am} \cdot \omega_{max}}}, \quad (19)$$

где ω_{max} - частота колебания атома, $\hbar$ - постоянная Планка. Зная температуру Дебая, находим данную частоту χ согласно уравнению $\omega_{max} = (k \cdot T_D) / \hbar$.

Поток диффундирующих атомов под воздействием электронного потока будет равен:

$$J_{A.Э.} = \frac{D \cdot n \cdot F_a}{kT}. \quad (20)$$

По сравнению с потоками диффундирующих атомов за счет термодиффузии и градиента концентрации вакансий в случае спекания в муфельной печи, величина потока за счет атомно-электронного взаимодействия является определяющей для расчета времени "зарастания" поры.

$$\sum J = J_{A.Э.} + J_T + J_L = -D \cdot n \cdot \left(\frac{F_a}{kT} + \frac{Q_T \cdot \nabla T}{kT^2} + \frac{8\pi\alpha}{kT \cdot S} \right). \quad (21)$$

Выводы.

Разработана математическая модель для расчета временных характеристик спекания металлических порошков как для муфельных печей, так и с помощью высокочастотных излучателей. Расчеты по данной модели позволяют выбрать оптимальные технические параметры используемых печей для спекания (мощность, температуру нагрева, соответственно габариты печи), что позволяет повысить экономические показатели производства.

Список использованной литературы

1. Гегузин Я.Е., Физика спекания. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука., 1984. - 312 с.
2. Лифшиц И.М., Азбель М.Я., Каганов М.И., Электронная теория металлов. Монография. - М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит., 1971. - 416с.
3. Абрикосов А.А., Основы теории металлов: учебное пособие. 2-е изд., доп. и испр. М: Физматлит., 2010. - 599 с.
4. Миронов Д.В., Покоев А.В., Влияние постоянного магнитного поля на зернограничную диффузию ^{63}Ni в поликристаллическом кобальте. Минск: 3 – я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 1999. - С. 170-172.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Статическая физика. 2-е издание. М: Наука., 1964.

СЕКЦІЯ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА

УДК 004.056

*Корицький В.І., Майгур О.І., Дідківський О.О., Заїченко Т.С.**Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв***АНАЛІЗ ЗАГРОЗ ІНФОРМАЦІЙНІЙ БЕЗПЕЦІ
WEB-ЗАСТОСУНКУ З МІКРОСЕРВІСНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ**

На початкових етапах розвитку мережі Інтернет взаємодія постачальників товарів та послуг, і клієнтів забезпечувалась статичними Web-сторінками, дані яких оновлювались в ручному режимі з певною періодичністю. Однак, зростання попиту на реалізацію товарів та послуг із застосуванням мережі Інтернет зумовило необхідність в реалізації Web-сторінок як динамічних об'єктів, дані яких оброблюються та надаються користувачеві за його запитом. Введення динамічної складової зумовило перетворення серверної частини Інтернет ресурсів у Web-застосунки з тришаровою архітектурою, в якій окремо виділялись модулі взаємодії з клієнтом, бізнес-логіки та сховище даних [1].

Організація Web-застосунків за тришаровою архітектурою приводила до появи труднощів в підтримці бізнес-шару та масштабуванні сховищ даних. Це зумовило перехід індустрії до сервіс-орієнтованої архітектури, в якій всі сервіси використовують загальне сховище даних, а їх взаємодія забезпечується окремим сервісом із застосуванням спеціалізованих протоколів обміну даними, наприклад, SOAP [2]. Таким чином, застосування такої архітектури не вирішує проблему масштабування монолітного сховища даних, а реалізація Web-застосунку ускладнюється використанням додаткових протоколів обміну даними.

Наявність вказаних недоліків обумовила появу мікросервісів – самостійних програм невеликого обсягу, які характеризуються слабкою зв'язаністю та сильним зачепленням [3]. Перша властивість означає, що внесення змін до одного мікросервісу не впливає на функціонування інших. Друга властивість забезпечує простоту внесення змін до програмного коду мікросервісів шляхом обмеження взаємозв'язків між ними. Використання такої архітектури забезпечує можливість реалізації Web-застосунків з високими масштабованістю та стійкістю [4].

При застосуванні мікросервісної архітектури функціонування Web-застосунку, в загальному випадку, забезпечується територіально розподіленою багатокористувачевою комп'ютерною системою. Тому, особливо важливою стає задача забезпечення основних властивостей інформації, яка циркулює в системі «Web-застосунок – клієнт»: конфіденційності, цілісності та доступності [5].

Метою роботи є формування вимог до комплексу засобів захисту інформаційних ресурсів Web-застосунку з мікросервісною архітектурою.

Варто відмітити, що будь-який Web-застосунок як складний програмно-апаратний комплекс оброблює значну кількість даних, в тому числі з обмеженим доступом [6]. Таким чином, можлива реалізація таких загроз: витік або пошкодження даних, які оброблює Web-застосунок, відмова його програмної частини, або порушення працездатності комп'ютерної системи, яка забезпечує функціонування застосунку. При цьому причини реалізації даних загроз можуть носити як навмисний (атаки зі сторони потенційного злоумисника) так і ненавмисний (помилки в реалізації програмного забезпечення, відмова апаратної частини) характер.

Для визначення уразливостей Web-застосунку з мікросервісною архітектурою, проаналізуємо узагальнений алгоритм його функціонування. Клієнт формує запит та надсилає його спеціальному мікросервісу – API-шлюзу. Даний мікросервіс аналізує запит та взаємодіє з усіма мікросервісами, які необхідно задіяти для виконання запиту клієнта. В процесі обробки запиту кожний мікросервіс застосунку взаємодіє з виділеною базою даних, в якій зберігається інформація достатня для функціонування даного мікросервісу. По завершенні виконання запиту (або у разі невдалої спроби його виконання) API-шлюз формує повідомлення-відповідь та надсилає його клієнтові.

Таким чином, існують наступні загрози доступності інформаційних ресурсів Web-застосунку з мікросервісною архітектурою:

- відмова певного мікросервісу або групи мікросервісів призведе до зниження характеристик обслуговування;
- відмова API-шлюзу призведе до повної відмови Web-застосунку, оскільки взаємодія з клієнтом організована саме через API-шлюз;
- відмова системи управління базами даних призведе до відмови Web-застосунку через неможливість виконання мікросервісами операцій над даними;
- відмова апаратного забезпечення комп'ютерної системи може призвести до зниження характеристик обслуговування або повної відмови Web-застосунку;
- втрата зв'язку між мікросервісом або групою мікросервісів та API-шлюзом призведе до зниження характеристик обслуговування.

Реалізація загрози відмови мікросервісу або групи мікросервісів обумовлена, здебільше, наявністю помилок в їх програмному коді, тобто носить ненавмисний характер. Інші з зазначених вище загроз можуть бути реалізовані як ненавмисно, так і потенційним зловмисником. Таким чином, забезпечення доступності інформаційних ресурсів Web-застосунку з мікросервісною архітектурою розділяється на дві задачі: моніторинг апаратної та програмної складових мікросервісів, і контроль доступу до них.

Детальніше розглянемо можливі дії потенційного зловмисника. Виходячи зі структури та особливостей функціонування Web-застосунку зловмисник може виконувати такі дії:

- видавати себе за авторизованого користувача, отримуючи доступ до певних наборів даних та функціоналу Web-застосунку;
- видавати себе за адміністратора, що робить можливою реалізацію дій, спрямованих на виведення з ладу окремих мікросервісів або Web-застосунку загалом;
- видавати себе за мікросервіс, що надає можливість спотворення інформації, яку оброблюють Web-застосунок та клієнт;
- організувати розподілену атаку типу «Відмова в обслуговуванні» (DDoS-атаку), спрямовану на API-шлюз, певну групу мікросервісів або загалом на весь Web-застосунок.

Аналіз шляхів передачі даних, а також принципів обробки інформації Web-застосунком дозволяє виділити такі загрози її безпеці:

- несанкціонований доступ (зчитування, модифікація, видалення інформації) потенційного зловмисника до баз даних мікросервісів;
- «прослуховування» зловмисником каналів інформаційного обміну між клієнтом та складовими Web-застосунку;
- спотворення інформації, яка передається відкритими каналами (між клієнтом та API-шлюзом, між мікросервісами);
- реалізація витоку інформації з обмеженим доступом за рахунок функціонування у складі Web-застосунку шкідливого програмного забезпечення (вірусів, шпигунського програмного забезпечення).

Актуальність зазначених загроз підтверджується дослідженнями Інтернет спільноти, зокрема, розробників Web-застосунків. Так, за даними співтовариства OWASP до десятки найнебезпечніших загроз інформаційній безпеці Web-застосунків належать: «Недостатня реєстрація подій та моніторинг», «Неналежний контроль доступу» та «Викриття конфіденційних даних» [7].

Згідно нормативної документації України в сфері технічного захисту інформації будь-який Web-застосунок, в тому числі з мікросервісною архітектурою, оброблюється автоматизованою системою класу 3, в якій, згідно виявлених загроз, пред'являються підвищені вимоги до конфіденційності, цілісності та доступності інформації [8]. Враховуючи вимоги нормативної документації до організації захисту Web-сторінок, комплекс засобів захисту Web-застосунку з мікросервісною архітектурою повинен реалізовувати наступні функціональні послуги безпеки [9, 10]:

- для організації захищеного сховища даних: базова адміністративна конфіденційність, мінімальна конфіденційність при обміні, мінімальна адміністративна цілісність, мінімальна цілісність при обміні;
- для організації модуля забезпечення доступності інформаційних ресурсів: автоматизоване відновлення після збоїв, комплекс засобів захисту з контролем цілісності, самотестування в реальному часі;
- для організації диспетчера доступу до інформаційних ресурсів: квоти, зовнішній аналіз, зовнішня ідентифікація та автентифікація, виділення адміністратора.

Висновки. В роботі проаналізовано принцип функціонування Web-застосунку з мікросервісною архітектурою та визначено перелік загроз безпеці його інформаційних ресурсів. За результатами проведеного аналізу відповідно до діючої нормативної документації України в сфері технічного захисту інформації сформовано перелік функціональних послуг захищеності інформації, які має реалізувати комплекс засобів захисту Web-застосунку. Подальшу роботу в даному напрямку буде зосереджено на розробці структури комплексу засобів захисту та його реалізації.

Список літератури

1. Вора П. Шаблоны проектирования веб-приложений / П. Вора М. : Эксмо, 2011. – 870 с.
2. Ричардсон К. Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга / К. Ричардсон. – СПб. : Питер, 2019. – 544 с.
3. Ньюмен С. Создание микросервисов / С. Ньюмен. – СПб. : Питер, 2016. – 304 с.
4. Фетцер К. Создание критически важных приложений на основе микросервисов / К. Фетцер // Открытые системы. СУБД. – 2017. – № 1. Режим доступа: <https://www.osp.ru/os/2017/01/13051598/>
5. НД ТЗІ 1.1-003-99 Термінологія в галузі захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. – Київ : ДСТСЗІ СБ України, 1999. – 23 с.
6. Пьюривал С. Основы разработки веб-приложений / С. Пьюривал – СПб. : Питер, 2015, – 272 с.
7. OWASP Top Ten [Електронний ресурс]. – The OWASP Foundation, 2017. Mode of Access: URL: <https://owasp.org/www-project-top-ten/>. – Title from the screen

8. НД ТЗІ 2.5-005-99 Класифікація автоматизованих систем і стандартні функціональні профілі захищеності оброблюваної інформації від несанкціонованого доступу. – Київ: ДСТСЗІ СБ України, 1999. – 18 с.
9. НД ТЗІ 2.5-010-03 Вимоги до захисту інформації WEB-сторінки від несанкціонованого доступу. – Київ : ДСТСЗІ СБ України, 2003. – 16 с.
10. НД ТЗІ 2.5-004-99 Критерії оцінки захищеності інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. – Київ : ДСТСЗІ СБ України, 1999. – 61 с.

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД.....	3
<i>Васильєв О.Г., Острогляд В.О., Пищенко А.О., Тростинський М.М.</i> Підвищення ефективності та розширення технологічних можливостей робототехнічного комплексу плазмового різання.	3
<i>Шарейко Д.Ю., Білюк І.С., Савченко О.В., Фоменко А.М.</i> Адаптивний регулятор у сучасних комплектних електроприводах	6
<i>Іванов А.В.</i> Перспективи розвитку моделей та методів керування вібраційними транспортуючими пристроями.....	12
<i>Козлов А.Ю.</i> Перспективи розвитку технологій виробництва високоякісних бетонних виробів із застосуванням керованих електромагнітних приводів та елементів з регульованою жорсткістю.....	14
<i>Стаканов Д.К.</i> Перспективи використання магнітоелектричних приводів на вібраційних сепараторах..	17
СЕКЦІЯ 2. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ	20
<i>Авдєєва О.А., Садовий О.С.</i> Удосконалення однофазного трансформатора з витим стрижневим магнітопроводом	20
<i>Жук О.К., Дзисюк Я.В., Буряк В.С.</i> Енергоефективність та якість електроенергії в автономних мікромережах морських суден і плавспоруді	22
<i>Циганов О. М.</i> Напрямок удосконалення трансформаторів на основі секціонування та комбінації марок сталі шихтованих магнітопроводів.....	28
СЕКЦІЯ 3. ІМПУЛЬСНІ ПРОЦЕСИ І ТЕХНОЛОГІЇ.....	31
<i>Гулько В.І., Дмитрішин О.Я., Фещук Т.А.</i> Експериментальні дослідження характеристик просоченого комбінованого плівкового діелектрика високовольних імпульсних конденсаторів	31
<i>Гулько В.І., Перекупка І.А., Танасова О.Д.</i> Експериментальні дослідження тривалої електричної міцності конденсаторних діелектричних систем.....	33
<i>Рачков О.М., Дмитрішин О.Я., Старков І.М.</i> Подрібнення склоподібної сировини розрядно-імпульсним способом.....	35
<i>Вовченко А.И., Козырев С.С., Овчинникова Л.Е.</i> Информационные координаты системы управления высоковольтным электрохимическим взрывом	37
<i>Колесник І.А., Рябенський В.М.</i> Спекание металлических порошков высокочастотным излучением в постоянном магнитном поле	39
СЕКЦІЯ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНА БЕЗПЕКА.....	44
<i>Корицький В.І., Майгур О.І., Дідківський О.О., Заїченко Т.С.</i> Аналіз загроз інформаційній безпеці web-застосунку з мікросервісною архітектурою.....	44