

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

МАТЕРІАЛИ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ

10-11 листопада 2020 року

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

МАТЕРІАЛИ

Миколаїв 2020

УДК 681.5:621.3
ББК 81а73
П 75

Автоматика та електротехніка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених [Електронний ресурс]. – Миколаїв: НУК, 2020. – 58 с.

У збірнику подані матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених "Автоматика та електротехніка".

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.

ОРГАНІЗАТОРИ:

1. МОН України;
2. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова;

Матеріали публікуються за оригіналами, наданими авторами. Претензії до організаторів не приймаються.

Комп'ютерна верстка:
Відповідальний за випуск:

О. О. Черно
О. О. Черно

© Національний університет кораблебудування, 2020

СЕКЦІЯ 1. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

УДК 621.31

Тарабанов М.Р., Скороходов В.А., к.т.н.

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

ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ БЕЗКОНТАКТНОЇ ЗАРЯДКИ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ПРИ НАЯВНІЙ ПОХИБЦІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ

За останнє десятиліття стрімко зростає кількість електротранспорту усіх потужностей. Міста світу активно переходять на громадський автономний електротранспорт, а люди у сегменті легкового автотранспорту все частіше віддають перевагу електромобілям, як основному способу пересування містом. Електромобілі стають більш доступними, що, вочевидь, з часом може призвести до швидкого збільшення їх числа на дорогах світу [1,9]. Це, в свою чергу, неодмінно призведе до загальних змін інфраструктури окремих держав з урахуванням потреб електротранспорту, що робить теми пов'язані з цим досить актуальними у сьогоденні.

Хоча у розвитку автономних джерел живлення (аккумуляторних батарей) для електротранспорту був зроблений величезний стрибок за останні роки [12], повноцінною альтернативою баку з паливом, як у автомобілів на двигуні внутрішнього згоряння (ДВЗ) вони не стали. Основною проблемою залишається недостатня ємність батарейних комплексів, які не дозволяють електромобілям за один повний цикл заряду батареї долати відстань, еквівалентну автомобілям на ДВЗ з повним баком пального. Саме тому сучасний електротранспорт доводиться заряджати значно частіше за транспорт на ДВЗ.

Для підвищення тривалості безперервної роботи електротранспорту та поліпшення комфорту користувачів зараз активно розробляються системи безконтактної зарядки, що можуть бути вмонтовані у землю та підзаряджати авто коли воно зупиняється, наприклад на світлофорах або автостоянках поблизу торговельних центрів, офісів. Проте однією з основних проблем таких систем, при впровадженні у реальних умовах залишається падіння вихідної потужності системи при похибці позиціонування автомобіля-приймача відносно зарядного комплексу-передавача [4].

Метою роботи є аналіз сучасних систем безконтактної зарядки електротранспорту та визначення шляху удосконалення таких систем для протидії зменшенню вихідної потужності через похибку позиціонування.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що системи безконтактної зарядки електротранспорту (БЗЕ) найчастіше представляють собою двоконтурну систему на основі резонансних інверторів із індуктивним зв'язком, виконаним за допомогою пари однакових котушок різних конфігурацій [2,6,9,10]. Такі системи у лабораторних умовах здатні передавати до 50 кВт потужності з ефективністю до 96.9% на відстані до 127мм [3]. Існуючі системи БЗЕ можна представити у вигляді структурної схеми наведеної на рис. 1 [7,9]. Часто у системах БЗЕ елементи КЗ та АБ спрощені до активного навантаження (проти ЕРС) [5].

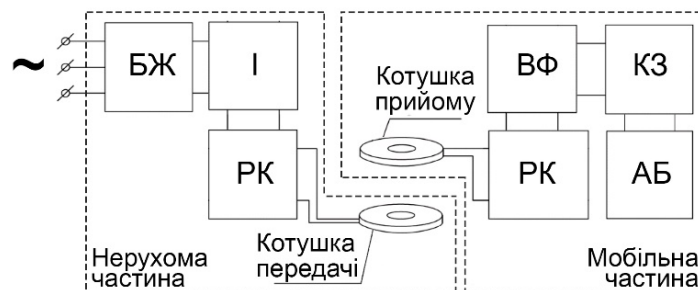


Рис. 1. Структурна схема системи безконтактної зарядки електротранспорту

На рис.1: БЖ – блок живлення, І – інвертор, РК – резонансний контур, ВФ – випрямляч з фільтром, КЗ – контролер заряду аккумуляторної батареї, АБ – аккумуляторна батарея.

Для отримання індуктивного зв'язку нерухомої та мобільної частин системи використовуються багато різних видів котушок. Їх аналіз було наведено у [6,10]. Так, наприклад, наразі прогресивними вважаються котушки з топологіями *DDQP* (*double-D quadrature polarized pad*) та *BPP* (*bipolar polarized pad*) [6]. Вони розраховані на роботу на відстанях – до десятків сантиметрів у залежності від своїх розмірів [2].

Проте, з точки зору розробки системи управління та визначення параметрів резонансних контурів системи БЗЕ, обидві котушки представляють собою ідентичні індуктивності, кожна з яких включена послідовно до інших елементів відповідного резонансного контуру. Загалом система з інвертора, резонансних контурів, трансформатора та випрямляча представляє собою резонансний перетворювач (РП) із індуктивним зв'язком. Існує багато конфігурацій резонансних контурів, але для подальшої роботи було обрано послідовно-послідовну топологію, оскільки послідовне підключення резонансного конденсатора на стороні випрямляча надає перетворювачу властивості джерела постійної напруги, що відповідає потребам системи для використання під час зарядки електротранспорту [7,9]. При роботі на резонансній частоті, регульовальна характеристика послідовно-послідовної топології не залежить від величини навантаження [5,7]. Таким чином, структура силової частини РП для безконтактної індуктивної передачі енергії (БІПЕ) у системах БЗЕ може бути представлена на рис. 2.

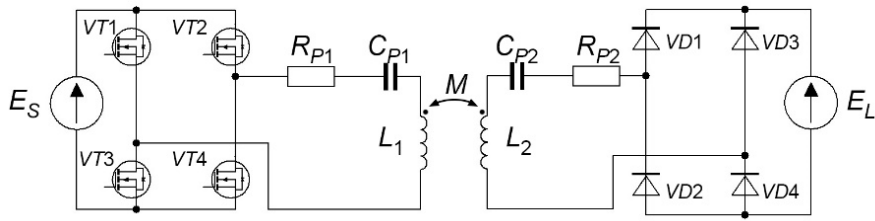


Рис. 2. Структура силової частини резонансного перетворювача для безконтактної індуктивної передачі енергії

На рис.2: E_S – ЕРС джерела, E_L – супроти-ЕРС навантаження, $R_{p1,2}$ – резонансний опір; $C_{p1,2}$ – резонансна індуктивність; L_1 – індуктивність котушки-передавача; L_2 – індуктивність котушки-приймача; M – взаємна індуктивність; $VT1-4$ – ключі інвертора, $VD1-4$ – діоди пасивного випрямляча.

Параметр M відіграє важливу роль під час процесу індуктивної передачі енергії на ряду з L_1 та L_2 , оскільки є складовою коефіцієнта зв'язку k – основного показника при оцінюванні індуктивної передачі енергії:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт зв'язку, M – взаємна індуктивність. У даній системі коефіцієнт k показує яка частина магнітного потоку з котушки L_1 взаємодіє з котушкою L_2 .

Під час роботи системи БЗЕ, власна індуктивність котушок практично не змінюється (беручи до уваги нагрів під час роботи), отже, основною причиною зміни взаємної індуктивності M , а отже і параметра k є геометрична неузгодженість котушок у просторі (похибка позиціонування). Оскільки M є єдиним параметром у силовій частині РП для БІПЕ, що залежить від похибки позиціонування, то для системи управління РП не має значення характер геометричної неузгодженості (напрямок плоско-паралельного зміщення котушок однієї відносно іншої, кути їх повороту).

Для правильної роботи системи БЗЕ обидва її контури повинні мати однакові резонансні частоти ω_0 (2), а отже в таких системах важливою є рівність параметрів: $R_{p1} = R_{p2}$, $C_{p1} = C_{p2}$, $L_1 = L_2$.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}}, \quad (2)$$

де L_p – резонансна індуктивність, C_p – резонансна ємність.

Зміна параметра M у силовій частині призведе до зміни еквівалентної індуктивності кожного з резонансних контурів, що в свою чергу вплине на резонансну частоту ω_0 . Для перевірки даного твердження застосовано Т-образну схему заміщення трансформатора [7]. Силу частину в цьому випадку зображено на рис.3.

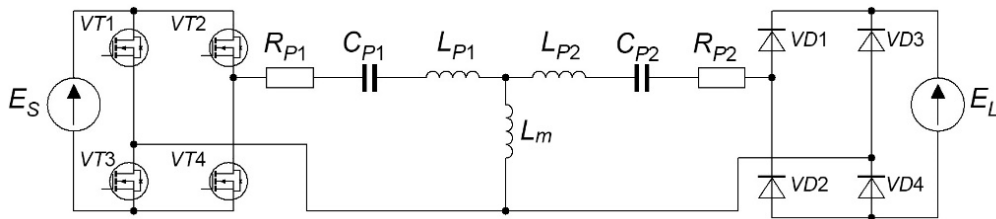


Рис. 3. Силова частина резонансного перетворювача для безконтактної індуктивної передачі енергії з Т-образною схемою заміщення трансформатора: L_{p1} – індуктивність розсіювання котушки передачі; L_{p2} – індуктивність розсіювання котушки прийому; L_m – індуктивність намагнічування.

Розрахунок параметрів силової частини РП (рис.3) наведено у [7]. За схемою з рис. 3 було складено характеристичне рівняння:

$$a_0 p^0 + a_1 p^1 + a_2 p^2 + a_3 p^3 + a_4 p^4 + a_5 p^5 = 0, \quad (3)$$

де коефіцієнти $a_0 - a_5$ визначаються як:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0; a_1 = 0; \\ a_2 &= ((R_{p1} + L_m) \cdot C_{p1} + R_{p2} \cdot C_{p2}) \cdot C_{p2}; \\ a_3 &= (R_{p1} \cdot R_{p2} \cdot C_{p1} \cdot C_{p2} + L_{p1} \cdot C_{p1} + L_{p1} \cdot C_{p2}) \cdot C_{p2}; \\ a_4 &= (R_{p1} \cdot L_{p2} + R_{p1} \cdot L_{p1} + (R_{p1} + R_{p2}) \cdot L_m) \cdot C_{p1} \cdot C_{p2}^2; \\ a_5 &= (L_{p1} + L_{p2}) \cdot L_m \cdot C_{p1} \cdot C_{p2}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Результатом розв'язання характеристичного рівняння є 5 коренів, 4 з яких утворюють комплексні пари, уявні частини яких є частотами натуральних коливань резонансних контурів та є рівними між собою. Оскільки параметр L_m присутній у трьох з чотирьох не нульових коефіцієнтах, він сильно впливає на результуючі резонансні частоти. Це означає, що зазначена геометрична неузгодженість котушок у просторі призведе до зміни резонансної частоти системи, а саме до підвищення резонансної частоти РП.

Для максимально ефективної роботи, повинна виконуватися рівність $\frac{\omega_P}{\omega_0} = 1$ [7,8], де ω_P – частота перетворення РП, ω_0 – резонансна частота. Підтримка цієї рівності є головною задачею системи управління. Із збільшенням відхилення $\frac{\omega_P}{\omega_0}$ від 1 буде зменшуватись вихідна потужність системи [8]. Це відбувається через те, що відношення частот впливає на напругу та струм у резонансному контурі. При відхиленні цього відношення від 1, напруга та струм у контурі котушки-передавача зменшуються [8] разом із магнітним полем котушки-передавача, що призведе до зменшення магнітного потоку. Результатом цього буде зменшення параметра k , та за законом індукції Фарадея, зменшення генерованої ЕРС у котушці-приймачі, що призведе до падіння вихідної потужності системи.

Серед розглянутих актуальних систем БЗЕ, що вже впроваджені в користування, більшість має системи управління РП, які працюють на заздалегідь встановлених параметрах (ширині керуючого імпульсу та його частоті). Деякі розглянуті системи, які представлені у вигляді лабораторних експериментальних стендів [7,11], мають складніші системи управління – вони використовують складні алгоритми, за допомогою яких задають частоту перетворення рівною резонансній. Такі системи можуть компенсувати втрати вихідної потужності через відхилення резонансної частоти. Але для роботи вони потребують додаткові датчики для детектування переходу кривої напруги через 0 в одному з резонансних контурів, а також обчислювальні пристрої здатні до розрахунку складних алгоритмів пов'язаних із зсувом фаз. Це робить такі системи складними та дорогими у виробництві.

Як альтернатива для таких систем, у цій роботі пропонується використовувати систему управління з широтно-частотним регулюванням. За допомогою ШІМ-регулятора можна виконувати скалярне регулювання вихідної потужності, а частотна складова регулювання зможе компенсувати зазначене відхилення відношення частот

$\frac{\omega_P}{\omega_0}$ від 1, що дозволить системі БЗЕ компенсувати додаткові втрати вихідної потужності через зміну резонансної частоти системи (ω_0) відносно частоти перетворення (ω_P) при геометричній неузгодженості котушок прийому-передачі у просторі.

Для роботи система управління потребує параметри, які можна отримати із вже встановлених у електромобілі систем. Так можна отримувати значення напруги на виході випрямляча з фільтром (ВФ), яка водночас є напругою на вході у контролер заряду батареї (КЗ), яка знімається самим транспортним засобом для задач моніторингу систем. Оскільки відомо, що збільшення геометричної неузгодженості котушок у просторі (похибки позиціонування транспорту відносно станції зарядки) призведе саме до підвищення резонансної частоти системи, то пропонується використовувати простий алгоритм (рис. 5), що буде збільшувати частоту перетворення, доки не буде досягнуто найбільшого значення напруги на виході випрямляча з фільтром – це буде означати, що знайдено нову резонансну частоту, відповідну поточному геометричному позиціонуванню котушок прийому-передачі.

Структурну схему запропонованої системи безконтактної зарядки електротранспорту наведено на рис.4.

Як показано на рис. 4, для передачі даних про енергетичні параметри системи з контролера заряду акумуляторної батареї (КЗ) та іншої інформації до системи управління (СУ), пропонується використовувати будь-який сучасний бездротовий інтерфейс передачі даних, наприклад Wi-Fi чи Bluetooth. Алгоритм роботи системи управління для такої системи БЗЕ наведено на рис. 5.

Даний алгоритм має декілька змінних, що встановлюються відповідно до умов реальної задачі: $d\omega$ – крок наближення частоти перетворення до резонансної; $V_{out}(0)$ – бажане значення напруги на виході РП; $n\%$ – коефіцієнт допустимої похибки, використовується при $V_{out}(0)$ та позначає межу допустимої похибки при роботі системи $n\%=0..1$; i_{max} – максимальна допустима кількість ітерацій налаштування. При розробці даного алгоритму було використано метод поступового наближення.

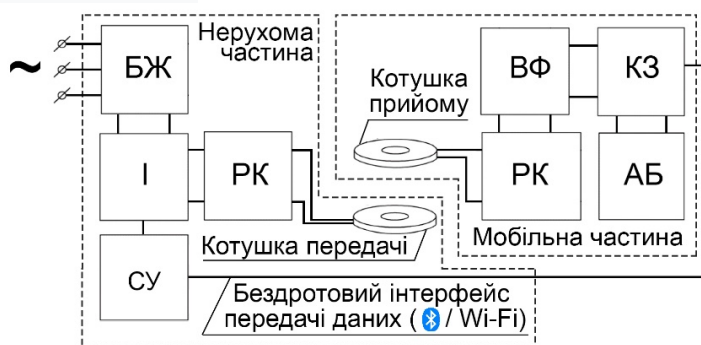


Рис. 4. Структурна схема системи безконтактної зарядки електротранспорту. СУ – система управління

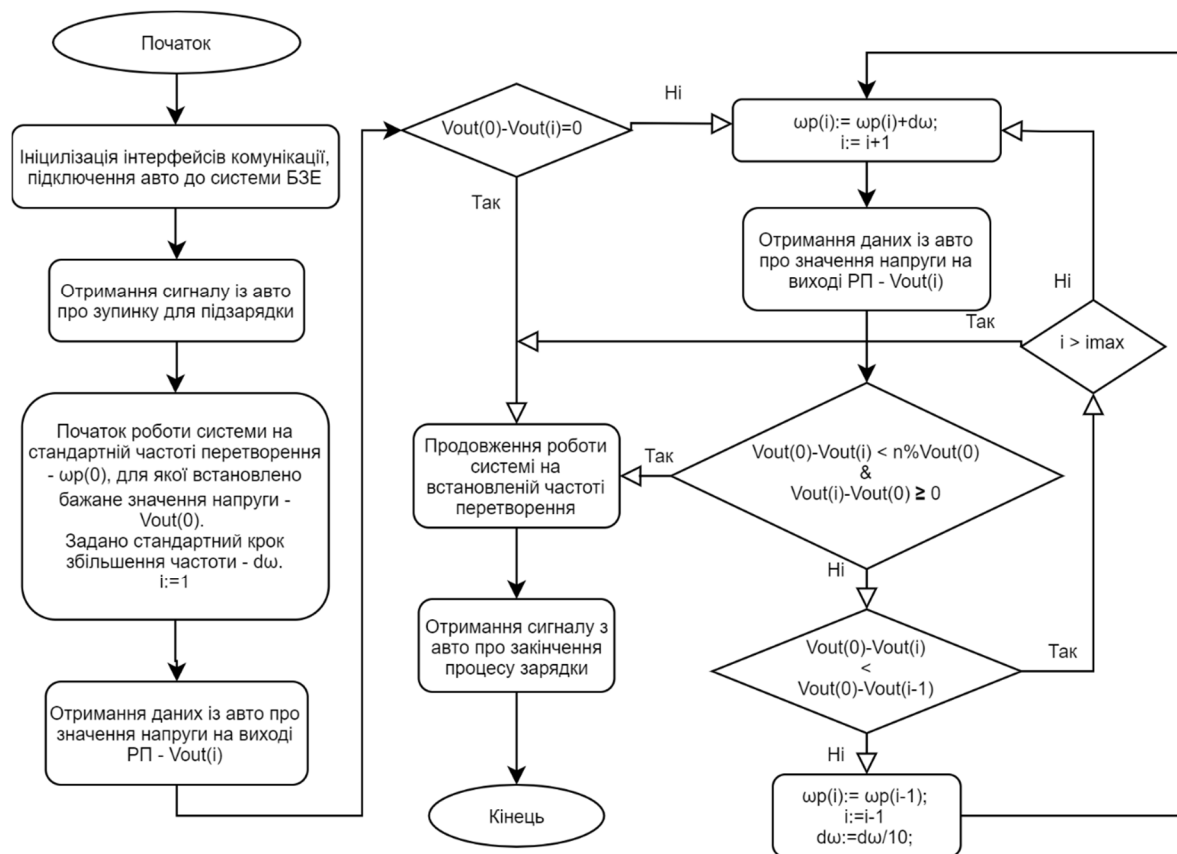


Рис. 5. Алгоритм роботи системи управління системою безконтактної зарядки електротранспорту

Система управління на основі такого алгоритму не потребує складних обчислювальних пристроїв та спеціальних систем датчиків, як у [7,11], натомість вона може бути реалізована на базі мікроконтролера із зовнішнім кварцовим резонатором та відповідним модулем бездротового зв'язку – Bluetooth або Wi-Fi. Це робить її значно простішою та дешевішою у виготовленні за наведені в роботі аналоги.

Висновки. Визначено, що падіння вихідної потужності у системі безконтактної зарядки електротранспорту через похибку позиціонування зумовлено не тільки зменшенням магнітного потоку через котушку-приймач через її геометричний зсув відносно магнітного поля котушки-передавача, але й послабленням цього магнітного поля в результаті відхилення частоти перетворення від резонансної частоти у резонансному перетворювачі у наслідок зазначеного геометричного зсуву котушки-приймача.

Для вирішення цієї проблеми було запропоновано варіант удосконалення системи безконтактної зарядки електромобіля за допомогою системи управління з широтно-частотним регулюванням, де частотна складова регулювання повинна компенсувати зміну резонансної частоти, тим самим запобігти послабленню магнітного поля котушки-передавача, що призводить до зменшення вихідної потужності системи через похибку позиціонування електротранспорту. Наведено загальну структурну схему такої системи безконтактної зарядки електротранспорту та алгоритм роботи її системи управління.

Запропоноване удосконалення системи безконтактної зарядки електромобіля повинно значно покращити досвід користування такими системами за рахунок зменшення втрат отриманої енергії при похибці позиціонування автотранспорту.

У подальших роботах буде продовжено дослідження та розробка запропонованої системи управління для системи безконтактної зарядки електромобіля. Так наступними задачами є: побудова імітаційної моделі системи, побудова математичної моделі електромобіля, проведення імітаційного та математичного моделювання для дослідження енергетичних процесів у резонансних контурах, синтез системи управління з широтно-частотним регулюванням, побудова експериментального лабораторного стенду.

Список літератури

1. Tsakalidis Anastasios, Thiel Christian. Electric vehicles in Europe from 2010 to 2017: is full-scale commercialisation beginning? - An overview of the evolution of electric vehicles in Europe. – 2018 – doi:10.2760/8053.
2. Fisher, T., Farley, K., Gao, Y., Bai, H., & Tse, Z. Electric vehicle wireless charging technology: A state-of-the-art review of magnetic coupling systems. // *Wireless Power Transfer*, – 2014, 1(2), pp. 87-96 – doi:10.1017/wpt.2014.8
3. V. P. Galigekere et al. Design and Implementation of an Optimized 100 kW Stationary Wireless Charging System for EV Battery Recharging // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, – 2018, pp. 3587-3592, – doi: 10.1109/ECCE.2018.8557590.

4. M. Budhia, G. A. Covic and J. T. Boys Design and optimisation of magnetic structures for lumped Inductive Power Transfer systems // 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA – 2009, pp. 2081-2088 – doi: 10.1109/ECCE.2009.5316197.
5. G. Pavlov, I. Vinnichenko, M. Pokrovskiy and N. Tarabanov. Electromagnetic Processes in Serial-To-Parallel Resonant Converter for Contactless Charging of Electric Vehicle Battery // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine – 2019, pp. 668-673 – doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783649.
6. C. Liu, C. Jiang and C. Qiu. Overview of coil designs for wireless charging of electric vehicle // 2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Chongqing – 2017, pp. 1-6 – doi: 10.1109/WoW.2017.7959389.
7. Щербінін, Т.В. Резонансні перетворювачі постійної напруги для безконтактної індуктивної передачі електроенергії // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, НУК, Миколаїв – 2013.
8. Павлов Г.В. Преобразователи постоянного напряжения на основе частотнорегулируемых последовательных резонансных инверторов // Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук, НУК, Украина, Николаев, – 2001.
9. Bi Zicheng, Kan Tianze, Mi Chunting Chris, Zhang Yiming, Zhao Zhengming, Keoleian Gregory A. A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility // Applied Energy №179, United Kingdom – 2016, pp. 413-425 – doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.003.
10. Marco Davide, Dolara Alberto, Longo Michela, Ya'ici Wahiba. Design and Performance Analysis of Pads for Dynamic Wireless Charging of EVs using the Finite Element Method // Energies. №12(21):4139 – 2019 – doi:10.3390/en12214139.
11. A. J. Moradewicz, M. P. Kazmierkowski. Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.57, №9, – 2010 pp. 3181-3190 – doi: 10.1109/TIE.2010.2051395.
12. Manzetti, Sergio & Mariasiu, Florin. Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 51. – 2015, pp. 1004-1012. – doi:10.1016/j.rser.2015.07.010.

УДК 621.3

Жук О.К., к.т.н., Равінський К.А., Золотченко В.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

АНАЛІЗ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАРЯДКИ СУДЕН НА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННІ

У цій статті розглядаються загальні проблеми зарядки потужних акумуляторів на судах з електроживленням, з акцентом на електричні пороми, які мають щільний графік і короткий час стикування. Переваги та проблеми індуктивної бездротової передачі енергії в порівнянні з дротовою для зарядки батарей на судах.

Мета: проаналізувати наявні рішення проблеми зарядки суден на електроживленні.

В даний час морські рухові установки зазнають трансформацію, що забезпечується наявністю літій-іонних батарей з високою ємністю зберігання енергії при постійно зменшуваних витратах на їх виробництво. Установка акумуляторів в силових дизель-електричних установках з сильно змінними профілями навантаження вже довела свою економічну доцільність завдяки досяжній економії палива. Крім того, використання акумуляторів потенційно може забезпечити без емісійну експлуатацію в екологічно чутливих місцях, в гаванях і поблизу густонаселених районів. Для перевезення на короткі відстані по маршруту, бортові акумуляторні батареї також можуть забезпечувати роботу з нульовим рівнем викидів за умови, що батареї можуть бути досить заряджені на кожній зупинці.

Перед суднобудівною промисловістю стоїть завдання розробки технології для двоконтурних поромів на електроживленні, які будуть експлуатуватися для коротких переходів. В результаті успішних демонстрацій технології в Норвегії, багато поромні маршрути, як очікується, можуть бути переведені на повністю акумуляторну або гібридну роботу під час майбутніх переходів з часом стикування, яке може становити всього 4-5 хвилин. Щоб поліпшити використання наявного часу стикування, були розроблені і випробувані спеціальні методи з'єднання на перших поромках з живленням від акумулятора. MS Ampere, який був першим повністю працюючим від акумуляторів норвезьким автомобільним поромом, який почав регулярну експлуатацію, наприклад, був оснащений двома альтернативними, спеціально розробленими зарядними пристроями. Одне з рішень використовує гравітаційну вилку, яка опускається в спеціально сформовану розетку, в той час як інше рішення спирається на трифазний пантограф з датчиком.

Хоча пороми які курсують на короткі відстані можуть експлуатуватися з батареями в якості єдиного бортового джерела енергії, така схема створює безпрецедентні проблеми для технології зарядки батарей. Як правило, такі судна працюють за жорстким графіком з коротким часом стикування, що означає, що час, доступний для зарядки, сильно обмежений, в той час як кількість енергії, що подається на батарею при кожній зупинці, має бути достатньою для підтримки регулярної і безперервної роботи. Це має на увазі необхідність потужної підзарядки. Однак багато поромів працюють у віддалених і сільських районах, де місцеві розподільні мережі мають обмежену пропускну здатність. Тому може знадобитися локальне накопичення енергії для подачі необхідної потужності під

час зарядки без перевантаження наявного джерела живлення або виникнення проблем з якістю місцевої напруги. Враховуючи певну потребу в енергії для зарядки батарей при кожній обмеженій за часом зупинці на причалі, стає вкрай важливим ефективно використовувати доступний час стикування для передачі енергії бортовим батареям.

Час, що витрачається на підключення і відключення зарядного обладнання, скорочує наявний час на передачу енергії, а це, таким чином, підвищує необхідну потужність берегового і бортового обладнання. Більш високі вимоги до зарядної потужності також можуть негативно позначитися на терміні служби акумуляторів.

Встановлені системи передачі електроенергії на судна були розроблені головним чином для забезпечення енергією з берега, щоб дозволити бортовим генераторам зупинятися, коли судна знаходяться в гавані протягом декількох годин або більше. У таких системах час, необхідний для ручного або автоматичного з'єднання кабелів з механічними штекерами, не робить істотного впливу на загальну роботу, навіть якщо ефективний час, необхідний для підключення і відключення, може досягати декількох хвилин. Однак час з'єднання більше хвилини неприйнятно для проектування поромів.

Звичайні підходи до зарядки акумуляторів, які можуть бути застосовані до поромів з електричним приводом, залежать від механічних контактів або штекерів. Таким чином, всі вони будуть схильні до механічного зносу і вимагають відносно точного позиціонування, яке може бути важкодоступне при експлуатації в складних погодних умовах. Крім того, прибережні поромі працюють в суворих і засолених умовах, що може бути складним завданням для електробезпеки. Надійні механізми швидкого і автоматичного відключення зарядної системи також необхідні для забезпечення безпеки в разі, якщо порому терміново потрібно покинути док.

Щоб уникнути проблем і обмежень, пов'язаних з механічними сполучними системами для зарядки потужних акумуляторів у вологому приморському середовищі, слід модернізувати і застосовувати технології безконтактної індуктивної передачі енергії на судна. Хоча бездротова індуктивна передача енергії добре відома і має широкий спектр застосування, зокрема для зарядки акумуляторів електромобілів, автобусів і залізничних транспортних засобів, для суднових енергетичних установок високої потужності це абсолютно нова концепція.

Дійсно, індуктивна зарядка без будь-якого механічного контакту підходить для повністю автоматизованої роботи без будь-якої необхідності в електричних і механічних інтерфейсах, які будуть піддаватися механічному зносу. Крім того, індуктивна передача енергії усуває прямі електричні контакти і проблеми, пов'язані з наявністю великої кількості снігу, льоду або інших забруднень, а також потенційними струмами витоку і корозією в солоному середовищі. Це може підвищити безпеку і надійність зарядки, уникаючи чутливих до положення рухомих частин. Гальванічна розв'язка також повинна бути передбачена між зарядним обладнанням на суші і бортовою електричною системою. Нарешті, однією з головних переваг є можливість передачі енергії без будь-якої механічної процедури підключення, що дозволяє краще використовувати обмежений час стикування для зарядки акумулятора.

Пристрої індуктивної передачі потужності можуть бути розроблені для швидкої передачі енергії кораблю, коли він прибуває в док і до моменту, коли він починає свій наступний рейс.

Ілюстрація передбачуваної системи безконтактної індуктивної передачі енергії судну на причалі показана на Рисунку 1. Для передачі енергії не потрібно ніякого механічного з'єднання, поки судно може утримуватися в розумному діапазоні навколо його очікуваного положення. Таким чином, тільки дуже повільне механічне позиціонування берегової системи було б необхідно для роботи в місцях з великими відмінностями між відливом і припливом. Однак одна з проблем розробки такої технології полягає в тому, що рівень потужності значно вище, ніж зазвичай для застосування на автомобілях і поїздах. Крім того, динамічні умови експлуатації системи для застосування на поромках можуть бути більш складними через часткового вільний рух судна щодо дока через вітер, хвилі, протяги і навантаження/розвантаження судна.

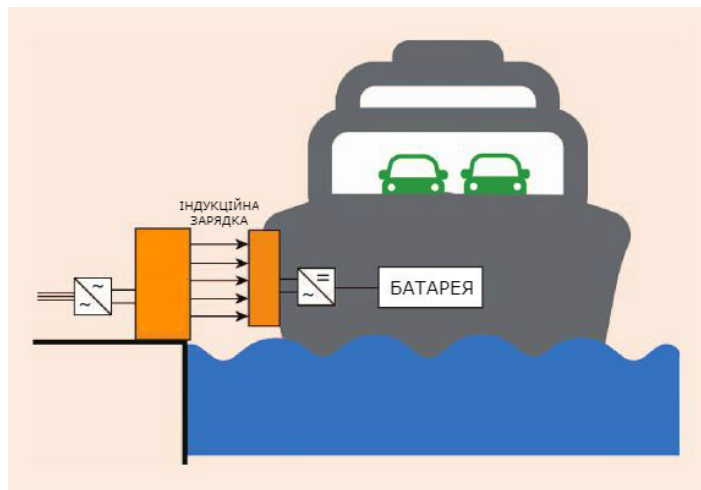


Рисунок 1 - Система безконтактної індуктивної передачі енергії судну на причалі

Висновки: у даній статті представлені передумови і результати ініціативи, спрямованої на розробку технології потужної індуктивної зарядки для морських застосувань. Було пояснено, як кораблі з підключеними гібридними або повністю акумуляторними двигунами можуть значно виграти від автоматизованої роботи, що забезпечується системами індуктивної зарядки, а також уникнути проблем надійності а також питання безпеки, пов'язані з механічними (штекерними) рішеннями. Проте морські програми мають безпрецедентні вимоги з точки зору вимог

до потужності та гнучкості щодо динамічних переміщень приймальної котушки під час заряджання порівняно з встановленими умовами для стаціонарного заряджання автомобільних або залізничних транспортних засобів. У перспективі потрібно вдосконалювати технологію високопотужної індуктивної зарядки, шляхом вирішення проблем контролю величини зазору між судном та зарядною станцією.

Список використаних джерел

1. G. A. Covic and J. T. Boys, "Inductive power transfer, " Proc. IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1276-1289, June 2013.
2. G. A. Covic and J. T. Boys, "Modern trends in inductive power transfer for transport applications, " IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. , vol. 1, no. 1, pp. 28-41, Mar. 2013.
3. J. H. Kim, B.-S. Lee, J.-H. Lee, S.-H. Lee, C.-B. Park, S.-M. Jung, S.-G. Lee, K.-P. Yi, and J. Baek, "Development of 1-MW inductive power transfer system for a high-speed train, " IEEE Trans. Ind. Electron. , vol. 62, no. 10, pp. 6242-6250, Oct. 2015.
4. C.-S. Wang, G. A. Covic, and O. H. Stielau, "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems, " IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 51, no. 1, pp. 148-157, Feb. 2004.
5. C. S. Wang, O. H. Stielau, and G. A. Covic, "Design considerations for contactless electric vehicle battery charger, " IEEE Trans. Ind. Electron. , vol. 52, no. 5, pp. 1308-1314, Oct. 2005.
6. R. Bosshard, J. W. Kolar, J. Mühlethaler, I. Stewanović, B. Wunsch, and F. Canales, "Modeling and n-o. - Paretooptimization of inductive power transfer coils for electric vehicles, " IEEE Emerg. Sel. Topics Power Electron. , vol. 3, no. 1, pp. 50-64, Mar. 2015.
7. G. Guidi, "An apparatus and a method for wireless transmission of power between dc voltage sources, " Norwegian Patent application 20150087, Jan. 2015.
8. G. Guidi and J. A. Suul, "Minimization of converter ratings for MW-scale inductive charger operated under widely variable coupling conditions, " in Proc. IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power, Daejeon, South Korea, June 2015, pp. 1-7.
9. G. Guidi and J. A. Suul, "Minimizing converter requirements of inductive power transfer systems with constant voltage load and variable coupling conditions, " IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 11, pp. 6835-6844, Nov. 2016.

УДК 621.314.26

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

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

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАРЯДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ АКУМУЛЯТОРНИХ МОРСЬКИХ СУДЕН

Актуальність. Генеральним напрямком удосконалення автономних енергетичних систем морських суден є підвищення їх енергоефективності з одночасним зменшенням викидів. Зазначена мета досягається шляхом широкого застосування в архітектурі судових електроенергетичних систем (СЕС) гребних електроустановок (ГЕУ) з використанням потужних напівпровідникових перетворювачів (НП). Останнім часом створюються чисто електричні морські рухові установки, що забезпечується постійним удосконаленням літій-іонних батарей з високою ємністю накопичення при постійному зниженні вартості. При перевезеннях на судах з короткими маршрутами (наприклад, на поромках або портових буксирах) використання акумуляторних батарей може забезпечити роботу з нульовим рівнем викидів за умови підзарядки до достатнього рівня енергії на кожній стоянці. Для поромів час стоянки, протягом якого здійснюється підзарядка, може становити всього 4-5 хв.[1].

Звичайні стикувальні вузли для зарядки акумуляторів, які застосовуються на електричних поромках або гібридних буксирах засновані на механічних контактах або штекерах [1]. Вони піддаються механічному зношуванню і вимагають точного позиціонування, якого важко досягти під час експлуатації в складних погодних умовах. Більш того, прибережні поромки і буксири працюють в суворих умовах обмерзання і засоленості, які негативно впливають на умови електробезпеки. Морські системи зарядки потребують надійних механізмів для швидкого і автоматичного підключення і відключення. З огляду на зазначені обставини мотивація використання індуктивної безконтактної передачі енергії для судових систем зарядки акумуляторів є настільки ж великою, як і для подібних систем для електромобілів.

Індуктивні зарядні системи (ІЗС) можуть забезпечити негайну передачу енергії на судно, від моменту швартування і до того моменту, коли воно починає наступний рейс. Проте, впровадження технології індуктивної зарядки в морському секторі вимагає вирішення деяких конкретних проблем [1, 2, 3, 4,]:

1. На відміну від електромобілів, електробусів або трамваїв, для суден потрібен значно вищий рівень енергії і потужності, що передаються, тому морський індуктивний зарядний пристрій повинен мати номінальну потужність порядку кількох одиниць мегават.

2. Під час зарядки акумуляторів високої потужності, автомобільні або залізничні транспортні засоби зазвичай знаходяться в стаціонарному положенні. Навпаки, пришвартоване судно може переміщуватися по відношенню до нерухомої частини зарядної системи через комбіновану дію вітру, хвиль і зміну осадки у процесі завантаження і вивантаження. Індуктивна зарядна система повинна бути влаштована так, щоб зазначені переміщення не впливали на величину переданої потужності, а також не знижували б ефективність та безпеку експлуатації зарядної системи. Це означає, що така система повинна мати високу стійкість до зсуву і зміни взаємного розташування елементів індуктивного зв'язку (катушок), а також довжини повітряного зазору між ними. Для відповідності такій вимозі система повинна контролювати зазначені переміщення, а також автоматично компенсувати їх вплив.

Метою даної роботи є аналіз напрямів удосконалення сучасних індуктивних зарядних систем для акумуляторних морських суден шляхом пошуку принципів забезпечення стабілізації переданої потужності (зарядного струму) і інваріантності показників енергоефективності зазначених систем до зміни умов індуктивного зв'язку.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- огляд та аналіз напрямів розвитку (механічна конструкція, схемотехнічні рішення та методи керування) сучасних морських ІЗС;
- аналіз основних залежностей зарядного струму і необхідної встановленої потужності інверторного перетворювача ІЗС від коефіцієнта зв'язку;
- розробка рекомендацій щодо можливих принципів компенсації впливу зміни коефіцієнта зв'язку на режим ІЗС.

Конструкція, схемотехніка та методи керування ІЗС.

До останнього часу у морських зарядних системах використовувались механічні контактні стикувальні вузли. Наприклад, для поліпшення використання доступного часу стикування перший в світі акумуляторний норвезький автомобільний пором MF Ampere, побудований у 2014 р., (рисунок 1) був оснащений двома розробленими на замовлення альтернативними зарядними пристроями. У одному з них використаний гравітаційний штекер який падає в спеціально сформовану штепсельну розетку, в той час як інше рішення засноване на трифазному пантографі з дизайном, запозиченим у залізничних системах. Характеристики зарядних систем для деяких гібридних та акумуляторних суден наведені в таблиці 1.

Морські системи зарядки потребують надійних механізмів для швидкого і автоматичного відключення у разі, коли порому потрібно терміново покинути док.

Таблиця 1 – Характеристики суднових зарядних систем

Судно	Ємність батареї	Потужність зарядки	Стикувальний вузол
Elfrida (Hybrid)	180 кВт год	?	? 400 В
Karoline (Hybrid)	195 кВт год	44 кВт	63 А штекер 400 В
GMV Zero	350 кВт год	2 x 87 кВт	2 x 125 А штекер 400 В
MF Folgefonn (Hybrid)	1000 кВт год	1 МВт	Індуктивний + штекер NG3
MF Ampere	1040 кВт год	1.2 МВт	ST Pantograf + штекер Cavotec
MF Future of the Fjords	1800 кВт год	2.1 МВт	Штекер Cavotec
Color (Hybrid)	5000 кВт год	7 МВт	Штекер NG3



Рисунок 1 – Батарейний пором MF Ampere

Щоб уникнути проблем і обмежень, пов'язаних з використанням механічних контактних вузлів для стикування систем для зарядки акумуляторів великої потужності в морському середовищі, норвезька суднобудівна промисловість виступила з ініціативою розробки технології бездротової безконтактної індуктивної передачі енергії на судно, принцип якої показано на рисунку 2 [5].

Така система містить береговий та судновий компоненти. Берегова частина – блок силової електроніки, підключений до основної електромережі, який спочатку випрямляє вхідну 3-фазну напругу живлення, а потім перетворює отриманий постійний струм на високочастотний змінний струм. Цей струм створює змінне магнітне поле передавальної пластини (катушки), яке індукує високочастотний змінний струм у бортовій приймальній пластині (катушці). Бортовий електронний компонент випрямляє цей змінний струм і подає отриману постійну напругу до шин мережі живлення судна. Передача потужності між передавальною та приймальною пластинами при використанні індуктивної зарядної технології здійснюється без кабелів та штекерів, навіть якщо пластини занурені в воду. Технологія індуктивної зарядки не потребує гальванічного контакту між береговою і бортовою частинами зарядного пристрою. Ця технологія працює за рахунок досить близького розміщення двох індуктивних котушок, які утворюють т. з. індуктивну або магнітну муфту, через яку здійснюється безконтактна передача енергії.

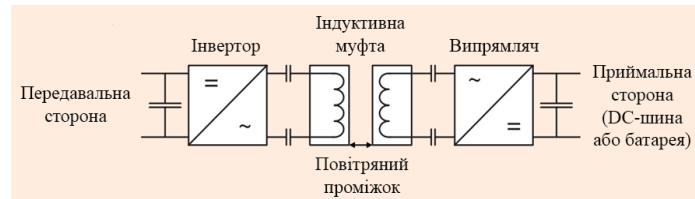


Рисунок 2 – Структурна схема індуктивної зарядної системи

У 2017 р. вперше в світі компанією Wärtsilä Marine Solutions вироблено, змонтовано і випробувано індуктивний зарядний пристрій на гібридному поромі MF Folgefonn. Реалізований пристрій забезпечує потужність передачі енергії до 2,5 МВт з ККД не менше 95% в умовах зміни повітряного проміжку між 15 і 50 см. Берегові та бортові частини пристрою зазвичай використовують напругу 690 В на змінному струмі, рівень якої можна адаптувати за допомогою трансформаторів. Також існує можливість підключення до розподільчих шин постійного струму. При напрузі 690 В потужність 2,5 МВт відповідає діючому значенню трифазного струму 2500 А. Щільність потужності, переданої через індуктивну муфту, складає 500 кВт/м² на робочій частоті в діапазоні 2 – 8 кГц. На вибір діапазону робочих частот впливає переважне використання у інверторі ІЗС порівняно дешевих і доступних стандартних мостових IGBT-модулів. З урахуванням значних очікуваних відносних зміщень котушок муфти у напрямі вгору – вниз для зменшення відносної зміни зони перекриття і коефіцієнта зв'язку між ними використовується подовжена у вертикалі конструкція, показана на рисунку 3.

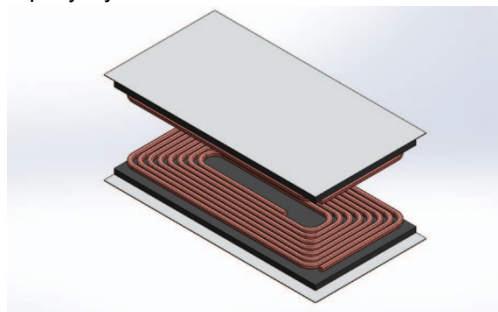


Рисунок 3 – Конструкція індукційних котушок

Загальний вигляд роботизованої зарядної системи Wärtsilä Marine Solutions, інтегрованої з установкою вакуумного автоматичного швартування Savotec (зліва) зображено на рисунку 4.

Система індуктивної зарядки може бути підключена до будь-якої конфігурації бортових і берегових енергосистем. Типова конфігурація системи для загального випадку підключення ІЗС до гібридної бортової електроенергетичної системи з розподільними шинами постійного струму і наземної установки з локальним акумуляторним накопичувачем енергії показана на рисунку 5.

Як додатковий варіант в конфігурацію системи також включена стандартна зарядна система на основі контактного з'єднання. При звичайній зарядці з підключенням до мережі змінного струму через штекер для забезпечення гальванічної розв'язки зазвичай потрібен спеціальний бортовий трансформатор, який має значну вагу (показаний в лівій частині рисунка 5) – це значний недолік штекерної системи.

Аналіз основних енергетичних показників ІЗС.

На рисунку 6 наведена топологія ІЗС з серієсно-серієсною (SS) ємнісною компенсацією реактивної потужності, а на рисунку 7 – еквівалентна розрахункова схема цієї системи.



Рисунок 4 – Загальний вигляд системи Wärtsilä Marine Solutions на поромі MF Folgefonn

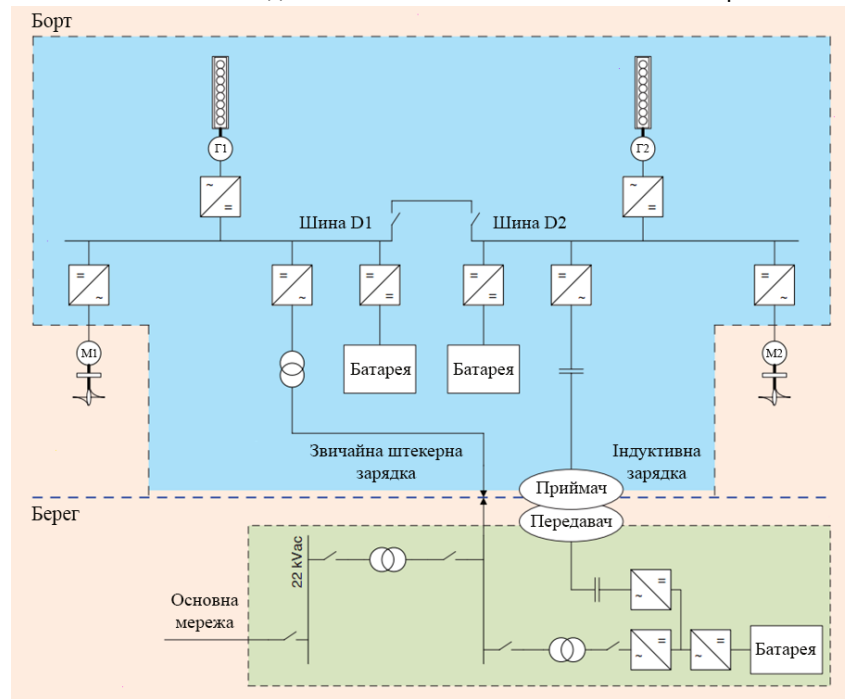


Рисунок 5 – Підключення суднової ІСЗ до берегової енергосистеми

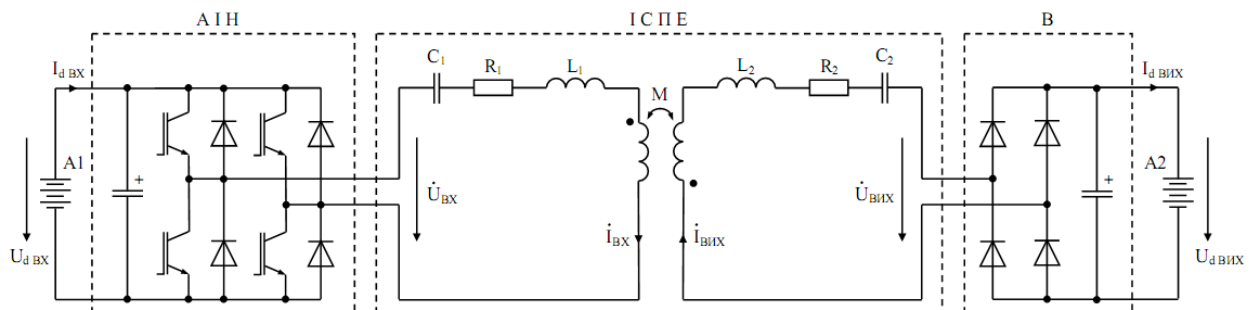


Рисунок 6 – Топологія типової ІЗС

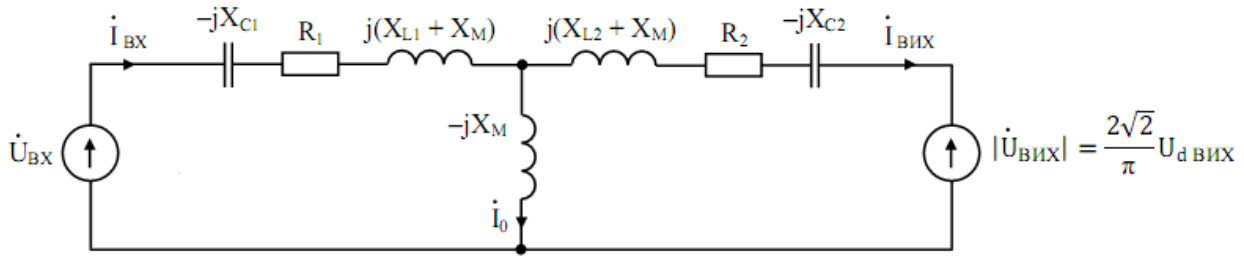


Рисунок 7 – Еквівалентна розрахункова схема ІЗС

Прийняті позначення: R_1, L_1, R_2, L_2 – активні опори та індуктивності розсіювання передавальної і приймальної котушок; M – взаємна індуктивність котушок; C_1, C_2 – компенсаційні ємності. Обидва контури (вхідний і вихідний) налаштовані на однакову резонансну частоту

$$\omega_0 = \omega_{0\text{ ВХ}} = \omega_{0\text{ ВИХ}} = 1/(L_1 C_1)^{1/2} = 1/(L_2 C_2)^{1/2} = 2\pi f_0.$$

При аналізі використовуємо гармонічну апроксимацію змінних напруг і струмів; навантаження розглядаємо як еквівалентний опір. Діючі значення комплексів вхідної і вихідної напруги і струму

$$0 \leq U_{\text{ВХ}} \leq 2\sqrt{2} U_{d\text{ ВХ}}/\pi; \quad U_{\text{ВИХ}} = 2\sqrt{2} U_{d\text{ ВИХ}}/\pi; \quad (1)$$

$$I_{\text{ВХ}} = \pi I_{d\text{ ВХ}}/(2\sqrt{2}); \quad I_{\text{ВИХ}} = \pi I_{d\text{ ВХ}}/(2\sqrt{2}). \quad (2)$$

Еквівалентний опір навантаження

$$R_{\text{ЕК}} = \frac{U_{\text{ВИХ}}}{I_{\text{ВИХ}}} = \frac{8}{\pi^2} \frac{U_{d\text{ ВИХ}}}{I_{d\text{ ВХ}}} \quad (3)$$

У [2] показано, що максимальний ККД індуктивної системи передачі енергії

$$\eta_{\text{max}} = k^2 Q_1 Q_2 / (1 + (1 + k^2 Q_1 Q_2)^{1/2})^2. \quad (4)$$

досягається за умови

$$a = R_{\text{ЕК}}/R_2 = (1 + k^2 Q_1 Q_2)^{1/2}. \quad (5)$$

де $k = M/(L_1 L_2)^{1/2}$ – коефіцієнт зв'язку; $Q_1 = \omega_0 L_1/R_1$; $Q_2 = \omega_0 L_2/R_2$ – добротності котушок зв'язку.

Теоретично максимальна величина ККД системи може досягати 97%.

Елементарний аналіз резонансного режиму еквівалентної схеми з нульовими втратами показує, що за умови $\dot{U}_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}$:

$$\dot{I}_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВИХ}}/X_M; \quad \dot{I}_{\text{ВИХ}} = -j U_{\text{ВХ}}/X_M; \quad \dot{U}_{\text{ВИХ}} = j U_{\text{ВИХ}}.$$

Тоді виходить, що комплексні і активні потужності вхідного і вихідного контурів співпадають за модулем, але протилежні за знаком, тобто вхідний контур є генеруючим, а вихідний – споживаючим:

$$\tilde{S}_{\text{ВХ}} = -\tilde{S}_{\text{ВИХ}} = P_{\text{ВХ}} = -P_{\text{ВИХ}} = U_{\text{ВХ}} U_{\text{ВИХ}}/(\omega_0 M); \quad (6)$$

Номінальна передана потужність ІЗС

$$P_{\text{НОМ}} = U_{\text{ВХ НОМ}} U_{\text{ВИХ НОМ}}/(\omega_0 M_{\text{НОМ}}). \quad (7)$$

За умови $M = \text{const}$ і $U_{\text{ВИХ}} \approx \text{const}$ передану потужність можна регулювати лише зміною $U_{\text{ВХ}}$. Якщо через зміну позиціонування котушок взаємна індуктивність змінюватиметься у діапазоні $M_{\text{min}} \leq M \leq M_{\text{max}}$ (при цьому вважається, що у слабо зв'язаних системах індуктивності L_1 і L_2 , а отже і резонансні частоти обох контурів ω_0 залишаються сталими), то при номінальній переданій потужності $P_{\text{НОМ}}$ виконуються наступні співвідношення:

$$P_{\text{НОМ}} = U_{\text{ВХ max}} U_{\text{ВИХ}}/(\omega_0 M_{\text{max}}) = U_{\text{ВХ min}} U_{\text{ВИХ}}/(\omega_0 M_{\text{min}}). \quad (8)$$

Отже, у резонансному режимі ІЗС з регульованою вхідною напругою $U_{\text{ВХ}}$ забезпечується одиничний коефіцієнт потужності у всьому діапазоні зміни взаємної індуктивності M . Це означає, що

$$P_{\text{НОМ}} = U_{\text{ВХ max}} I_{\text{ВХ min}} = U_{\text{ВХ min}} I_{\text{ВХ max}}. \quad (9)$$

Таким чином, максимальне значення необхідної встановленої потужності передавального АІН

$$S_{\text{ВХ max}} = U_{\text{ВХ max}} I_{\text{ВХ max}} = (M_{\text{max}}/M_{\text{min}}) P_{\text{НОМ}} = (k_{\text{max}}/k_{\text{min}}) P_{\text{НОМ}}. \quad (10)$$

Останній вираз свідчить про те, що встановлена потужність пропорційна відношенню максимального і мінімального значень k , тобто, чим більшим є діапазон зміни коефіцієнта зв'язку k , тим вищим буде необхідний номінал встановленої потужності АІН при заданому номіналі переданої активної потужності.

Висновки: інваріантність ІЗС до значних позиційних переміщень і відповідних змін коефіцієнта зв'язку може бути досягнута двома способами: 1) механічне позиціонування для фіксації взаємного положення обох котушок індуктивного зв'язку; 2) деяка припустима варіація коефіцієнта зв'язку має бути компенсована системою керування силового інверторного перетворювача. Система має контролювати зміну умов зв'язку і автоматично компенсувати їх негативний вплив на ефективність ІЗС. Недоліками першого шляху є складність, недостатня надійність і значна вартість. Другий шлях вимагає попереднього теоретичного дослідження умов забезпечення високих енергетичних показників ІЗС разом і стабільності зарядного струму при зміні коефіцієнта зв'язку за рахунок керування вихідною частотою і напругою інвертора.

Список використаної літератури

- 1 G. Guidi, J. A. Suul, "Minimization of Converter Ratings for MW-scale Inductive Charger Operated under Widely Variable Coupling Conditions," in Proc. of the IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power, 2015 WoW, Daejeon, Korea, 5-6 June 2015, pp. 23-32
- 2 S. Li, C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 4-17, Mar. 2015
- 3 C. Zheng, H. Ma, J.-S. Lai, L. Zhang, "Design Considerations to Reduce Gap Variation and Misalignment Effects for the Inductive Power Transfer System," IEEE Trans. on Power Electron., Vol. 30, No. 11, pp. 6108-6119, Nov. 2015
- 4 C. Zheng, J.-S. Lai, R. Chen, W. E. Faraci, Z. U. Zahid, B. Gu, L. Zhang, G. Lisi, D. Anderson, "High-Efficiency Contactless Power Transfer System for Electric Vehicle Battery Charging Application," IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 65-74, Mar. 2015
- 5 www.wartsila.com WÄRTSILÄ® is a registered trademark. Copyright © 2018 Wärtsilä Corporation. Specifications are subject to change without prior notice. Wärtsilä Marine Solutions | Wireless Charging

СЕКЦІЯ 2. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

УДК 681.5

Фоменко Л.А., Гараєв К.Р., Бондар В.С., Беляшкін М.С., Лопухов О.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

СТЕНД ДЛЯ МАГІСТЕРСЬКИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Актуальність проблеми. Підтвердження адекватності математичних моделей, та підтвердження наукових положень можливо у повній мірі лише за проведенням натурного експеримента. Отже доцільність створення лабораторного стенду для дослідження елементів систем автоматики, промислових роботів, верстатів з ЧПК для підтвердження результатів наукових досліджень у магістерських роботах очевидна. До того ж розроблений стенд може бути використаний в інших технічних пристроях електромеханічних систем керування електроприводами.

Аналіз літератури [1-9] дозволив відокремити систему керування безколекторного двигуна постійного струму, що містить принципову схему, на якій розташовані мікроконтролер, транзисторні ключі, лінійний стабілізатор напруги, кнопки керування, світлодіоди індикації режимів роботи двигуна та клеми підключень.

Мета роботи – створити стенд для дослідження безколекторних електроприводів постійного струму, який повинен мати ручний та автоматичний режими керування. Дослідження перехідних режимів та вимірювання електромеханічних характеристик безколекторних електроприводів постійного струму.

Для вирішення цієї задачі в лабораторному стенді [1] було змінено на Atmega16, який має більший об'єм пам'яті та більшу кількість портів вводу/виводу. Для наочної індикації режимів роботи стенду було використано символічний дисплей HD 44780, на який виводиться інформація про оберт двигуна, режим керування та стан стенду. Система керування має датчики фазного струму, швидкості, кута та напрямку обертання. Також стенд для дослідження електропривода на базі безколекторного трифазного двигуна постійного струму з'єднаний з ПЕОМ через інтерфейс RS485, який дає можливість керування стендом тільки за допомогою програмного забезпечення, не використовуючи прилади ручного керування. Зв'язок з ПЕОМ дає можливість приймати та обробляти сигнали датчиків у режимі реального часу. Зв'язок з ПЕОМ гальванічно розв'язаний від системи керування за допомогою DC-DC перетворювача та оптронів з транзисторним виходом, що забезпечують високу швидкість обміну даними. Також система керування працює від єдиного джерела живлення [10].

Принципова схема лабораторного блоку живлення наведена на рисунку 1.

Система керування безколекторного трифазного двигуна постійного струму містить (рис.1): вхідний діодний міст – 1, лінійні стабілізатори напруги – 2, мікроконтролер Atmega16 – 3, кнопки керування стендом – 4, транзисторні ключі – 5, буферні мікросхеми – 6, роз'єм підключення двигуна – 7, DC-DC перетворювач – 8, мікросхема інтерфейсу RS-485 – 9, роз'єм підключення RS-485 – 10, оптрони з транзисторним виходом – 11, роз'єм програмування контролера JTAG – 12, символічний дисплей HD 44780 – 13, роз'єм програмування контролера ISP AVR.

Висновок. Лабораторний стенд для наукових досліджень, що розроблено компактний, надійний та довговічний що досягається за рахунок використання єдиного джерела живлення, більш потужного контролера, гальванічної розв'язки зв'язку з ПЕОМ та модульності конструкції. Це дозволяє легко удосконалювати стенд в залежності від характеру та напрямку подальших наукових досліджень замінюючи один блок іншим.

Список використаних джерел

1. <http://radiolaba.ru/microcotrollers/podklyuchenie-dvigatelya-hdd-k-mikrokontrolleru.html>.
2. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 1: Аналогові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2010. – 144 с.
3. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 2: Цифрові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2014. – 142 с.
4. Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Комплектні електроприводи": у 3 ч. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2014. – 32 с.
5. Комплектні електроприводи. Ч. 3. Сервоелектроприводи [Електронний ресурс] : навч. посібник : електрон. вид. комбін. використання на DVD-ROM. У 3 ч. Ч. 3 Ч. 3. Сервоелектроприводи / І. С. Білюк, Д. Ю. Шарейко, А. М. Фоменко, О. В. Савченко; МОН України, НУК ім. адмірала Макарова. – Електрон. дані. – Миколаїв : НУК, 2018. – Назва з етикетки диска.
6. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Н.Л. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. Высш. Учеб. Заведений. – 3-е изд., испр. – М: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
7. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. – М.: «Эльф ИПР», 2006, 286 с.

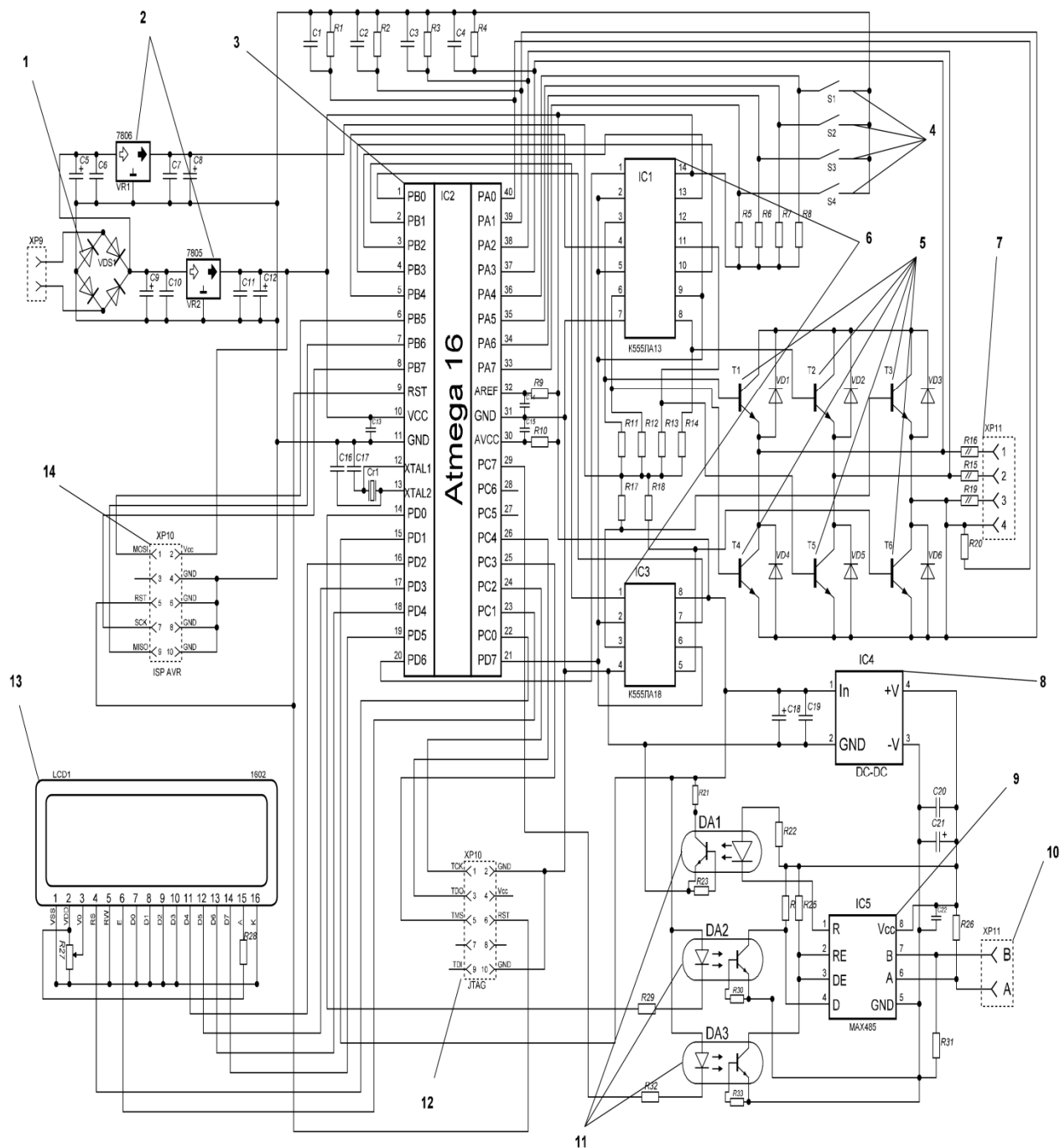


Рисунок 1. – Принципова схема лабораторного блоку живлення

8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. Посібник/ М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. –К.: Либідь, 2005. – 680 с.

9. А.Ф. Дашенко, В.Ф. Кириллов, Л.В. Коломиец, В.Ф. Оробей. MATLAB в инженерных и научных расчетах.– Одесса: «Астропринт», 2003. – 212 с.

10. Патент на корисну модель, №138062 «Лабораторный стенд по исследованию работы безконтактного двигателя на постоянной струму»// О.В. Савченко, С.І. Ольшевський, І.С. Білюк, Д.Ю. Шарейко, А.М. Фоменко, Л.А. Фоменко, О.В. Майборода, С.О. Гаврилов Л.І Бугрим, Бюл №22, 2019р.

УДК 681.5

*Великий О.Ф., Главацький Д.О., Єремєєв В.П., Лук'янчук А.Р., Станіслав А.І.**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв***МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ**

Актуальність проблеми полягає у необхідності модернізації та удосконалення вітчизняного верстатного парку. Оскільки ця проблема знаходиться у безпосередній близькості до проблеми конкурентоздатності промислових виробів.

Мета роботи: Розробити мікропроцесорну систему керування, яка може бути використана у промислових роботах та верстатах, а також може бути використана в інших технічних пристроях електромеханічних систем керування.

Аналіз літератури [1-9] показав, що існуючі системи керування кроковими двигунами не можуть сполучати керування кроковими двигунами за допомогою персонального комп'ютера і в ручному режимі та не мають можливості перемикання режимів мікрокроку двигуна, а також можливість роботи від універсального джерела живлення.

Для вирішення цієї задачі в системі керування кроковими двигунами, було встановлено більш потужний мікроконтролер Atmega128, який має більше портів вводу та виводу і більший об'єм пам'яті. Додано роз'єми для програмування мікроконтролера через інтерфейс ISP та JTAG. Для живлення силової частини було додано регульований стабілізатор напруги LM338, який має більшу потужність. Для більш точного керування було додано драйвер крокового двигуна TB6600HQ, за допомогою якого можна реалізувати мікрокрокові режими роботи двигуна, такі як 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 та 1/32 кроку та встановлено оптрони і DC/DC перетворювачі, для гальванічної розв'язки мікропроцесора. Для ручного керування та вибору режимів роботи було додано кнопки та енкаrementальний енкодер. Для відображення режимів роботи системи керування було додано символічний дисплей 20x4 HD44780. Додано контролер MAX485 для керування системою за допомогою персонального комп'ютера через інтерфейс RS485. Також у системі керування додано релейні виходи [10].

Система автоматичного керування наведена на рисунку 1.

Система автоматичного керування складається з принципової схеми на рис.1, на якій розташовані релейні виходи – 1, транзисторна збірка ULN2003 – 2, роз'єм програмування мікроконтролера ISP – 3, DC/DC перетворювачі SPU02M-05 – 4, енкаrementальний енкодер EC11B20244 – 5, лінійний стабілізатор напруги LM7805 – 6, роз'єм програмування мікроконтролера JTAG – 7, роз'єм підключення джерела живлення – 8, регульований стабілізатор напруги LM338 – 9, преремікачі мікрокрокових режимів роботи – 10, мікрокрокові драйвери TB6600HQ – 11, роз'єми підключень крокових двигунів – 12, кнопки ручного керування – 13, транзисторні оптрони розв'язки силової частини – 14, символічний дисплей 20x4 HD44780 – 15, кінцеві вимикачі – 16, мікросхема послідовного порту FT232RL – 17, роз'єм USB-B – 18, транзисторні оптрони розв'язки інтерфейсів RS232 та RS485 – 19, мікросхема інтерфейсу RS485 – 20, роз'єм підключення RS485 – 21, мікроконтролер Atmega16 – 22.

При роботі системи керування забезпечується живлення від єдиного джерела живлення, модульність конструкції дозволяє легко замінювати вийшовший з ладу елемент та перепрограмувати мікроконтролер.

Висновок. Система керування, що розроблена має покращення з компактності, точності керування, надійності та довговічності системи керування, яке досягається за рахунок мікрокрокового режиму керування кроковими двигунами, модульності конструкції та використання єдиного джерела живлення.

Список використаних джерел

1. <http://radiolaba.ru/microcotrollers/podklyuchenie-dvigatelya-hdd-k-mikrokontrolleru.html>.
2. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 1: Аналогові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2010. – 144 с.
3. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 2: Цифрові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2014. – 142 с.
4. Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Комплектні електроприводи": у 3 ч. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2014. – 32 с.
5. Комплектні електроприводи. Ч. 3. Сервоелектроприводи [Електронний ресурс] : навч. посібник : електрон. вид. комбін. використання на DVD-ROM. У 3 ч. Ч. 3 Ч. 3. Сервоелектроприводи / І. С. Білюк, Д. Ю. Шарейко, А. М. Фоменко, О. В. Савченко; МОН України, НУК ім. адмірала Макарова. – Електрон. дані. – Миколаїв : НУК, 2018. – Назва з етикетки диска.
6. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Н.Л. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. Высш. Учеб. Заведений. – 3-е изд., испр. – М: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.

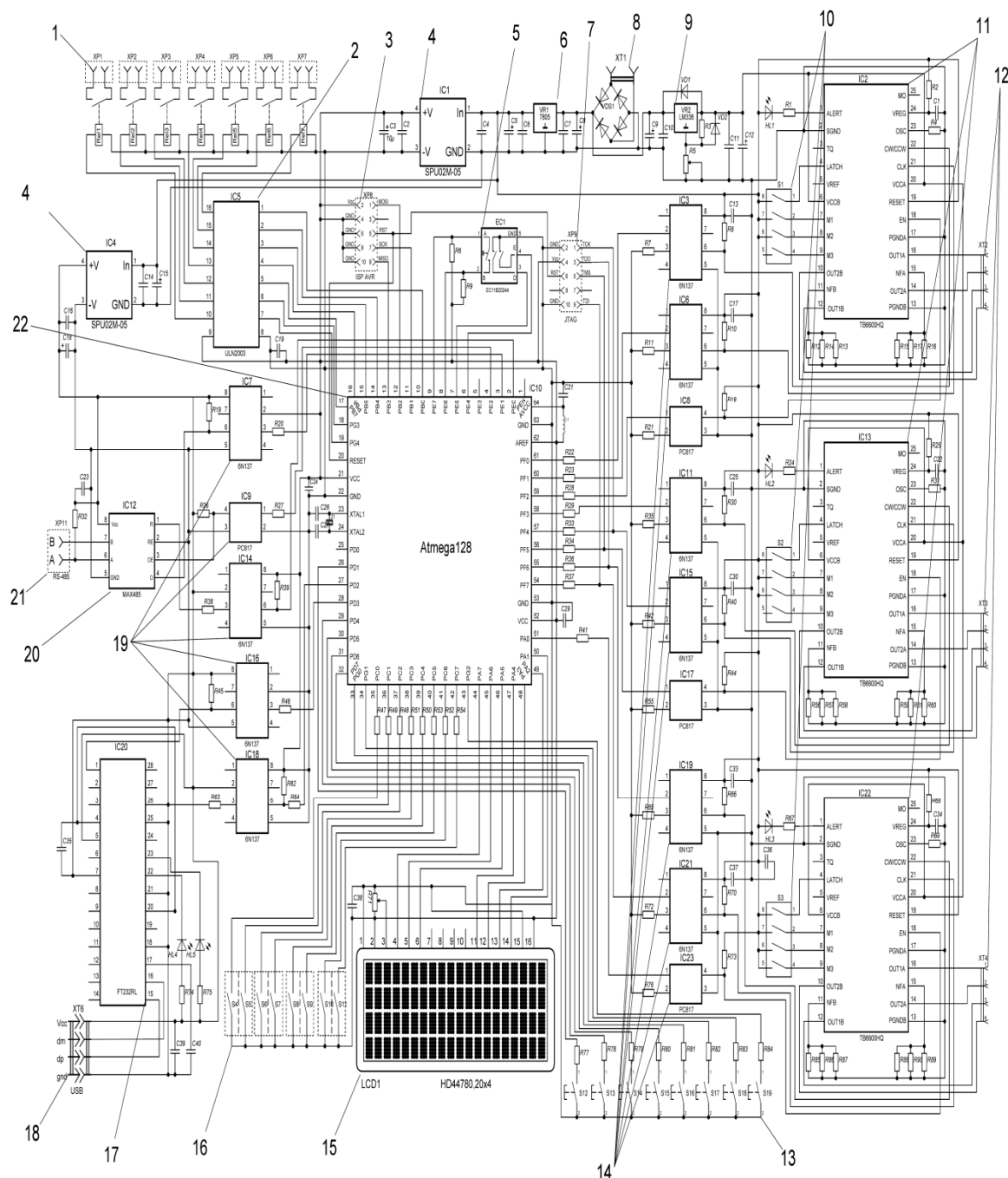


Рисунок 1 – Принципова схема системи керування кроковим двигуном

7. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. – М.: «Эльф ИПР», 2006, 286 с.

8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. Посібник/ М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. –К.: Либідь, 2005. – 680 с.

9. А.Ф. Дашенко, В.Ф. Кириллов, Л.В. Коломиец, В.Ф. Оробей. MATLAB в инженерных и научных расчетах.– Одесса: «Астропринт», 2003. – 212 с.

10. Патент на корисну модель, №136520 «Мікропроцесорна система керування електроприводами промислового обладнання»// О.В. Савченко, І.С. Білюк, А.М. Фоменко, Д.Ю. Шарейко, Р.А. Ставинський, С.І. Ольшевський, Л.А. Фоменко, С.О. Гаврилов І.В Оружак, Бюл №16, 2019р.

УДК 681.5

Захаренко М.І., Булацевський Д.В., Запорожець А.Г., Мередов Я.С., Попадюк Т.О., Гапчук О.О.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СЕРВОПРИВОДАМИ

Актуальність проблеми. Удосконалення вітчизняного промислового обладнання визначається перш за все тим, що крокові двигуни замінюються сервоелектроприводами. Отже розробка системи керування для таких приводів задача цілком актуальна. Наведена система керування відноситься до промислових роботів і може бути використана в інших технічних пристроях електромеханічних систем керування з сервоприводами.

Аналіз літератури [1-9] дозволив визначити базовий варіант, який більш за все підходить для сполучання з вітчизняним обладнанням. [10]. Проте ця схема має низку недоліків.

Мета роботи - створити систему автоматичного керування сервоприводами, в якій живлення було єдине для всіх елементів, точність керування забезпечувалося більш потужним контролером, а надійність підвищувалася за рахунок модульності конструкції.

Для вирішення цієї задачі в системі керування сервоприводами, було використано мікроконтролер мікроконтролер Atmega8. Також в систему було додано семи сегментний індикатор, для відображення роботи мікроконтролера. В схемі додано роз'єм для програмування контролера за допомогою програматора ISP. Також для керування серводвигуном було додано енкаrementальний енкадер.

Покращення компактності, точності керування, надійності та довговічності системи керування досягається за рахунок модульності конструкції.

Система автоматичного керування наведена на рисунку 1.

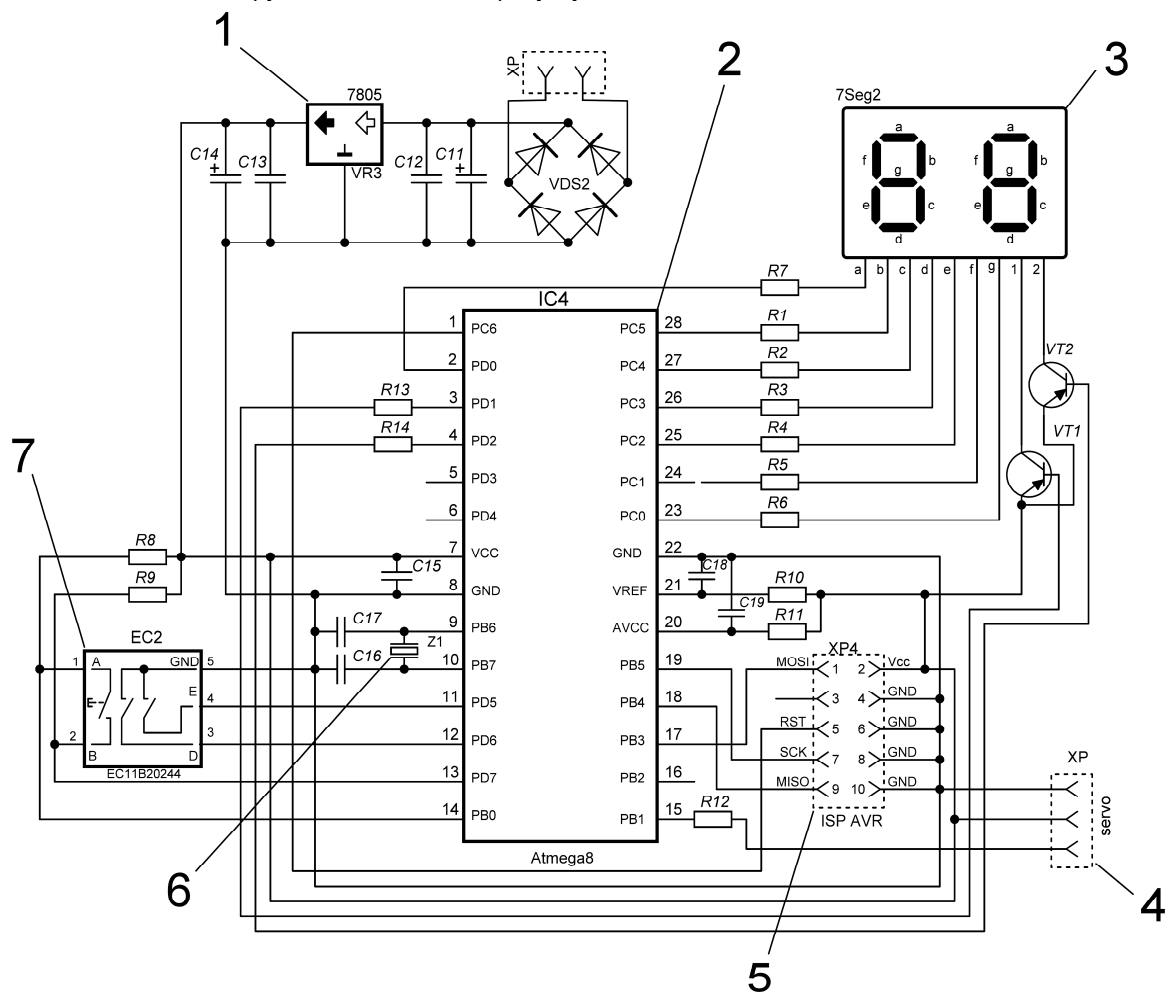


Рисунок 1 – Система автоматичного керування сервоприводами

Система автоматичного керування (рис.1), на якій розташовані: лінійний стабілізатор напруги – 1, мікроконтролер Atmega8 – 2, семи сегментний індикатор – 3, роз'єм підключення серводвигуна – 4, роз'єм програмування мікроконтролера – 5, кварцевий резонатор – 6 та енкаrementальний енкадер – 7.

При роботі системи керування забезпечується живлення від єдиного джерела, модульність конструкції яка дозволяє легко замінювати вийшовший з ладу елемент та перепрограмувати мікроконтролер.

Висновок.

Розроблена система має зручність у контролі керування, що досягається завдяки семисегментному індикатору. Можливість легкого перепрограмування системи керування досягається через спеціально вбудований роз'єм. Також було додано енкrementальний енкодер, для керування сервоприводом.

Список використаних джерел

1. <http://www.avislab.com/blog/serva>.
2. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 1: Аналогові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2010. – 144 с.
3. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 2: Цифрові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2014. – 142 с.
4. Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Комплектні електроприводи": у 3 ч. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2014. – 32 с.
5. Комплектні електроприводи. Ч. 3. Сервоелектроприводи [Електронний ресурс] : навч. посібник : електрон. вид. комбін. використання на DVD-ROM. У 3 ч. Ч. 3. Сервоелектроприводи / І. С. Білюк, Д. Ю. Шарейко, А. М. Фоменко, О. В. Савченко; МОН України, НУК ім. адмірала Макарова. – Електрон. дані. – Миколаїв : НУК, 2018. – Назва з етикетки диска.
6. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Н.Л. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. Высш. Учеб. Заведений. – 3-е изд., испр. – М: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
7. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. – М.: «Эльф ИПР», 2006, 286 с.
8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. Посібник/ М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. –К.: Либідь, 2005. – 680 с.
9. А.Ф. Дашенко, В.Ф. Кириллов, Л.В. Коломиец, В.Ф. Оробей. MATLAB в инженерных и научных расчетах.– Одесса: «Астропринт», 2003. – 212 с.
10. Патент на корисну модель, №136567 «Система керування сервоприводами»// О.В. Савченко, І.С. Білюк, А.М. Фоменко, Д.Ю. Шарейко, С.І. Ольшевський, С.О. Гаврилов, Л.І. Бурим, О.С.Кириченко, Л.А. Фоменко, Бюл №16, 2019р.

УДК 681.5

*Холод П.А., Ридош Є.Є., Лановенко О.В., Мойсеєнко С.С., Стружук М.Я., Нуриєв І.Н.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ТАХОГЕНЕРАТОРА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Актуальність проблеми. Створення лабораторної бази для навчального процесу задача загальновідома. Особливо важливо створити такий стенд за допомогою якого можна розв'язувати багато задач одразу. Розробка, що пропонується відноситься до лабораторних стендів для дослідження елементів систем автоматики, промислових роботів, верстатів з ЧПК і може бути використана в інших технічних пристроях електромеханічних систем керування.

Аналіз літератури [1-9] дозволив визначити базову модель стенда який задовольняв би вимогам досліджень [<http://opticstoday.com/katalog-statej/stati-na-ukrainskom/elementi-ta-pristroi-sistem-upravlinnya-avtomatiki/elektroprivid-avtomatichnix-pristroiv/doslidzhennya-taxogeneratora-postijnogo-strumu.html>]

Мета розробки – створити лабораторний стенд для дослідження роботи тахогенератора постійного струму, який повинен мати оптичний тахометр та мікроконтролер, за допомогою якого був би реалізований широтно-імпульсний регулятор для двигуна постійного струму та регулювання швидкості в процентах від 1 до 100 і відображенню значень на символічному дисплеї.

Для вирішення цієї задачі в лабораторному стенді було додано мікроконтролер Attiny2313, за допомогою якого було реалізоване широтно-імпульсне регулювання швидкості двигуна та зняття характеристик оптичного тахометра. Також у стенді було використано символічний дисплей, на якому виводиться значення оптичного тахометра та режими роботи мікроконтролера. У коло керування двигуном постійного струму було додано вольтамперметр, для зняття характеристик системи керування. Навантаження у колі якоря тахогенератора відбувається за допомогою перемикача S6

Покращення компактності, точності керування, надійності та довговічності системи керування досягається за рахунок модульності конструкції та використання оптичного тахометра [10].

Лабораторний стенд по дослідженню роботи тахогенератора постійного струму наведений на рисунку 1.

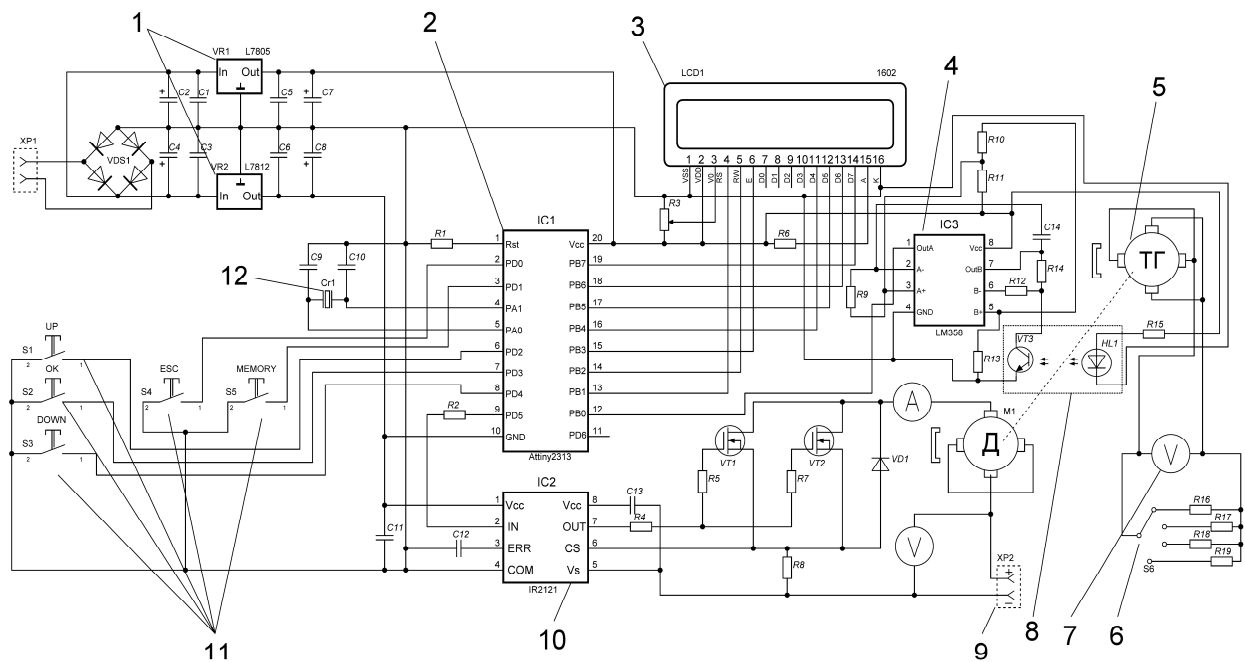


Рисунок 1 – Принципова схема розробленого стенда

Лабораторний стенд по дослідженню роботи тахогенератора постійного струму (рис.1), містить: лінійні стабілізатори – 1, мікроконтролер – 2, Символьний дисплей 16x2 – 3, операційний підсилювач – 4, тахогенератор постійного струму – 5, перемикач навантаження у колі якоря тахогенератора – 6, вольтметр тахогенератора – 7, датчик оптичного тахометра – 8, роз'єм живлення двигуна – 9, драйвер ключа нижнього рівня – 10, кнопки керування стендом – 11, кварцевий резонатор – 12.

При роботі лабораторного стенду забезпечується точність керування за допомогою мікроконтролера та оптичного тахометра. Модульність конструкції, дозволяє легко замінювати вийшовший з ладу елемент та перепрограмувати мікроконтролер. При випробовуванні тахогенератора враховуються всі чинники, які спотворюють його зовнішню характеристику.

Всі причини, що викликають відхилення вихідної характеристики тахо-генератора від прямолінійної, ведуть до амплітудної похибки. Тахогенератори постійного струму мають амплітудну похибку від 0,5 до 3%. В тахогенераторах постійного струму можлива пульсація вихідної напруги, обумовлена низкою причин: зубчатою поверхнею осердя якоря; нерівномірністю повітряного проміжку або неоднаковою магнітною провідністю осердя якоря по різним радіальним напрямкам; вібрацією щіток та замиканням секцій обмотки якоря в процесі комутації; невеликою кількістю секцій в обмотці якоря через малі габаритні розміри машини. Пульсації напруг можуть вносити завади в роботу автоматичних пристроїв, елементом яких являються тахогенератори. Пульсації напруг можна послабити за рахунок більш якісної технології виготовлення тахогенератора з застосуванням “веерной” збірки листів осердя якоря (листки вкладають в пакет з здвигом на одну зубцеву поділку), а також підключенням згладжувального фільтра на вихід тахогенератора. Однак повністю позбутися завад не вдається. Амплітуди пульсацій вихідної напруги тахогенераторів постійного струму складають 0,1 – 3 % від середнього значення вихідної напруги.

Переваги тахогенераторів постійного струму порівняно з асинхронними тахогенераторами: менші габаритні розміри і маса (в 2-3 рази) при більшій вихідній потужності; відсутність фазової похибки; можливе збудження постійними магнітами, що дозволяє обійтись без джерела живлення для кола збудження.

Разом з цим тахогенератори постійного струму мають недоліки, які обмежують їх застосування: наявність ковзаючого контакту між щітками і колектором, що приводить до зниження надійності тахогенератора і до нестабільності вихідної характеристики; наявність зони нечутливості; пульсація вихідної напруги; завади радіоприйому для знищення яких в деяких випадках приходиться застосовувати спеціальні заходи.

Таким чином, будь-який різновид тахогенератора має свої переваги та недоліки. Тому при виборі тахогенератора необхідно виходити з конкретних умов його роботи і вимог, які пред'являються до тахогенератора з боку автоматичного пристрою, для якого він призначається. На розробленому стенді можна фіксувати зазначені чинники, та перевіряти математично обґрунтовані шляхи їх подолання.

Висновок.

Стенд що розроблено, дозволяє контролювати параметри регулювання завдяки мікроконтролеру Attiny2313 та широтно-імпульсному регулюванню. Завдяки символьному дисплею, здійснюється індикація режимів роботи, а оптичний тахометр контролює швидкість двигуна.

Список використаних джерел

1. <http://optictoday.com/katalog-statej/stati-na-ukrainskom/elementi-ta-pristroi-sistem-upravlinnya-avtomatiki/elektroprivid-avtomatichnix-pristroiv/doslidzhennya-taxogeneratora-postijnogo-strumu.html>
2. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 1: Аналогові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2010. – 144 с.
3. Фоменко А.М., Шарейко Д.Ю. Комплектні електроприводи: У 3 ч. Ч. 2: Цифрові комплектні електроприводи: Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2014. – 142 с.
4. Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Комплектні електроприводи": у 3 ч. Ч. 1. – Миколаїв: НУК, 2014. – 32 с.
5. Комплектні електроприводи. Ч. 3. Сервоелектроприводи [Електронний ресурс] : навч. посібник : електрон. вид. комбін. використання на DVD-ROM. У 3 ч. Ч. 3 Ч. 3. Сервоелектроприводи / І. С. Білюк, Д. Ю. Шарейко, А. М. Фоменко, О. В. Савченко; МОН України, НУК ім. адмірала Макарова. – Електрон. дані. – Миколаїв : НУК, 2018. – Назва з етикетки диска.
6. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Н.Л. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. Высш. Учеб. Заведений. – 3-е изд., испр. – М: Издательский центр «Академия», 2007. – 576 с.
7. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. – М.: «Эльф ИПР», 2006, 286 с.
8. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. Посібник/ М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. –К.: Либідь, 2005. – 680 с.
9. А.Ф. Дашенко, В.Ф. Кириллов, Л.В. Коломиец, В.Ф. Оробей. MATHLAB в инженерных и научных расчетах. – Одесса: «Астропринт», 2003. – 212 с.
10. Патент на корисну модель, № 136568 «Лабораторний стенд для дослідження роботи тахогенератора постійного струму»// О.В. Савченко, І.С. Білюк, А.М. Фоменко, Д.Ю. Шарейко, С.О. Гаврилов, С.І. Ольшевський, Л.І. Бугрим, О.С.Кириченко, Л.А. Фоменко, Бюл №16, 2019р.

УДК 681.5

Муштаєва Ю.Д.

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

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА СТІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

В різних галузях промисловості широко використовуються стрічкові конвеєри, основною функцією яких є переміщення вантажів різного типу та призначення. Подальше якісне вдосконалення автоматизації конвеєрних ліній повинно розвиватись в напрямку підвищення централізації керування на базі виконання спеціалізованих комп'ютерів і мікроконтролерів, що дозволить підвищити оперативність керування за рахунок обробки більшого об'єму інформації про роботу конвеєрів, причини аварійних ситуацій, вести роботу конвеєрів в оптимальних режимах. Автоматизація конвеєрного транспорту передбачає оснащення його електропривода системою керування, а також засобами автоматичного контролю і захисту. Системи автоматичного керування електроприводів конвеєрів з урахуванням сучасних вимог повинні мати достатньо великі функціональні можливості для забезпечення якісного керування.

Основними факторами, що впливають на процес автоматизації конвеєрних ліній є: кількість конвеєрів; різноманітність конвеєрів за їх технологічним призначенням, продуктивністю, конструктивному виконанню, довжині і динамічними характеристиками; різноманітність технологічних схем конвеєрних ліній по конфігурації, довжині і динамічними характеристиками; різноманітність приводів конвеєрів за кількістю та типом двигунів і т.д.

На даний момент питанням розробки автоматизованих електроприводів стрічкових конвеєрів присвячена значна кількість робіт. Так в роботі [1] проведено аналіз технічних вимог до електроприводів багатодвигунних конвеєрів для транспортування вантажів у металургійному виробництві, а в роботах [2-3] досліджено вплив налаштувань електроприводів на характеристики протягом пуску конвеєрів. Питання оптимального керування рухом рухом стрічкового конвеєра у перехідних режимах присвячена робота [4]. Не зважаючи на значну кількість досліджень з питань систем керування електроприводами стрічкових конвеєрів, залишаються невирішеними або вирішеними не в повній мірі питання застосування нових типів систем частотного керування, які здатні забезпечити більшу точність керування.

Метою даної роботи є розробка автоматизованого електропривода стрічкового конвеєра та визначення основних показників якості керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для широкодіапазонних швидкодіючих електроприводів потрібно застосовувати структуру векторного керування або пряме керування моментом [5]. Раціональною з точки зору технічної реалізації система векторного керування, що представлена на рис. 1.

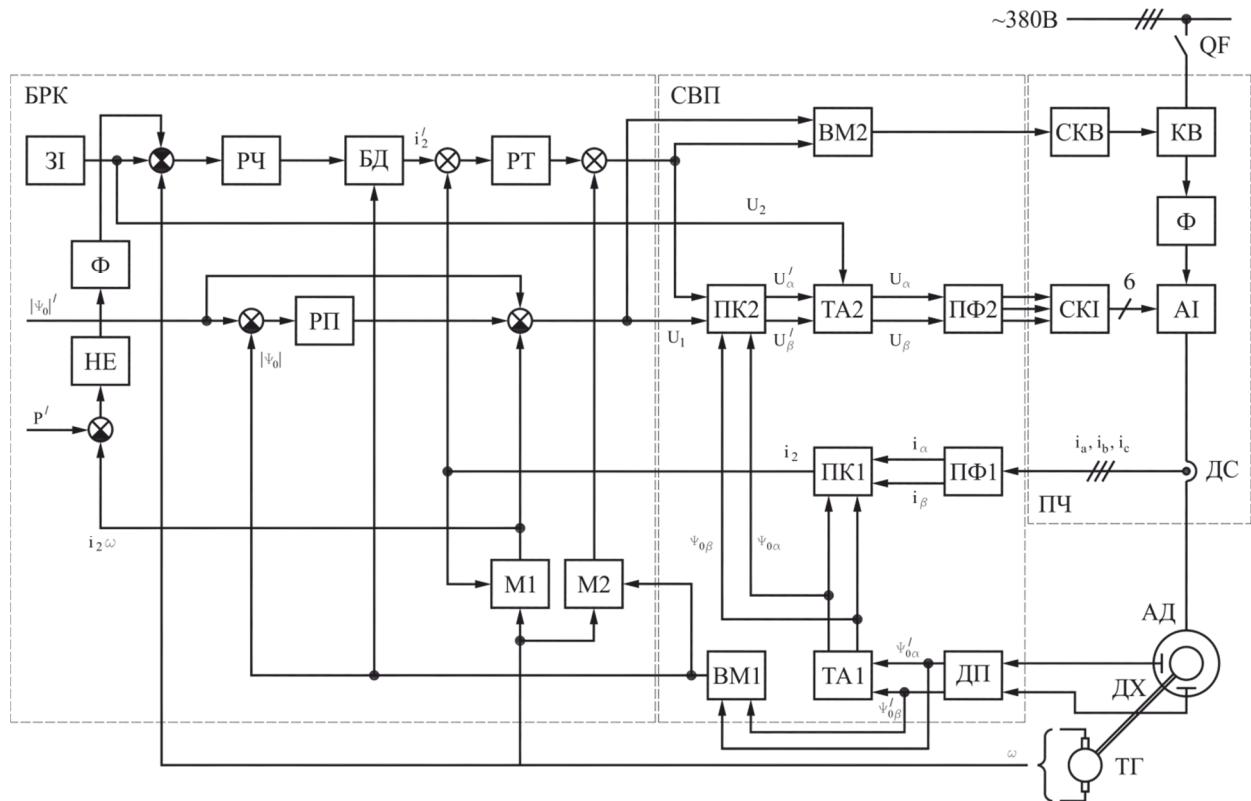


Рисунок 1 – Функціональна схема системи векторного керування

Блок регулювання та компенсації (БРК) містить канал керування модулем головного потокозчеплення та канал керування швидкістю. Спеціальні блоки, які входять до складу системи векторних перетворень (СВП) реалізують алгоритми роботи схеми.

При дослідженні систем векторного керування короткозамкненим асинхронним двигуном зі стабілізацією амплітуди магнітного потоку в зазорі машини застосовується спрощена система диференціальних рівнянь [6]:

$$\frac{d}{dt} |\psi_0| = \frac{(1-k_s)R_r}{(1-k_s k_r) L_r} |\psi_0| + \frac{k_s(1-k_s)}{1-k_s k_r} U_{s1} + \frac{L_m p_0 \omega (1-k_s)(1-k_r)}{1-k_s k_r} i_2; \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} i_2 = -\frac{R_s + k_r R_r}{(1-k_s k_r) L_s} i_2 + \frac{1}{(1-k_s k_r) L_s} U_{s2} - \frac{p_0 \omega}{(1-k_s k_r) L_s} |\psi_0|; \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{3 p_0}{2 j} |\psi_0| i_2 - \frac{1}{j} M_c, \quad (3)$$

де U_{s1} , U_{s2} – складові напруги статора в обертальній системі координат, які жорстко зв'язані з головним потокозчепленням;

i_2 – складова узагальненого вектора струму статора на ординату обертальної системи координат.

Рівняння (1)–(3) описують процеси в електричній машині, що живиться від ідеалізованого перетворювача частоти. З системи виключені нелінійні члени, що мають малу питому вагу, які містять добутки змінних (трансформаторних ЕРС на індуктивностях розсіювання), опір ротора прийнятий постійним.

З використанням технічних даних стрічкового конвеєра, його епюри натягу, а також методик в роботах [7, 8], встановлено потужність приводного електродвигуна. Обрано електродвигун модель RA160ML4 потужністю 15 кВт і частотою обертів 1460 об/хв. В якості перетворювача частоти використано модель ВЕСПЕР EI-9011, який призначено для регулювання швидкості обертання стандартних асинхронних електродвигунів з керування вектором потоку як зі зворотним зв'язком від датчика обертання так і без нього.

Для дослідження динамічних процесів регулювання швидкості та визначення основних показників якості керування може бути використаний комп'ютерний пакет Matlab Simulink. На основі наведеної вище функціональної схеми була розроблена структурна схема автоматизованого електропривода стрічкового конвеєра, на її основі проведено імітаційне моделювання. Результати моделювання динаміки системи розробленого автоматизованого електропривода стрічкового конвеєра проілюстровано на рис. 2.

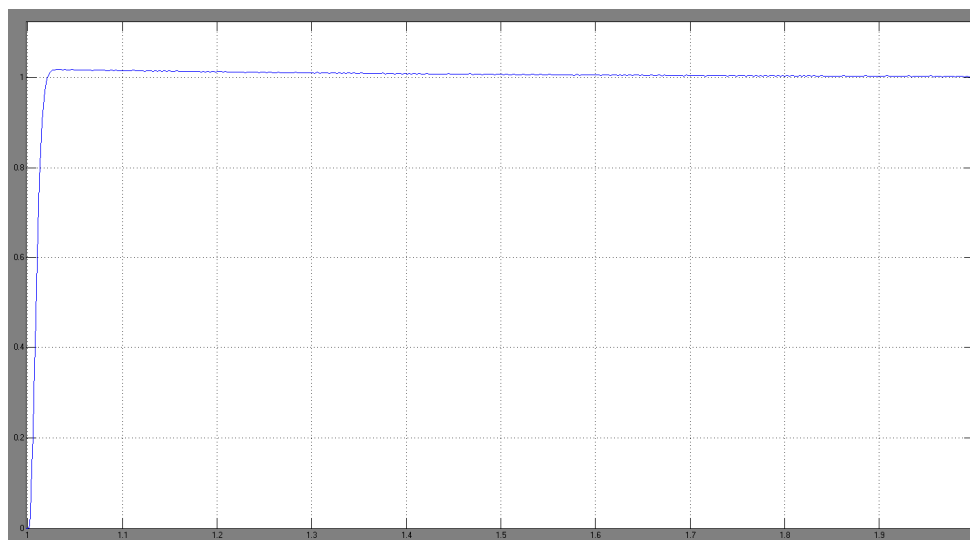


Рисунок 2 – Перехідний процес за швидкістю з малим перерегулюванням

Результати моделювання показали задовільну тривалість перехідного процесу і малу величину перерегулювання за швидкістю. Величина перерегулювання не перевищує 30 %, тому, отримані результати можна вважати прийнятними.

Висновки. В даній роботі розроблено автоматизований електропривод стрічкового конвеєра з використанням системи векторного керування. Для обраної системи керування проаналізовано функціональну схему та розглянуто спрощену систему диференціальних рівнянь, що описують її роботу. Також, досліджено динаміку системи та визначено основні показники якості керування: час перехідного процесу 1,5 с, перерегулювання не перевищує 5 %.

Список літератури

1. Іноземцев О.М., Шеремет О.І. Аналіз технічних вимог до електроприводів конвеєрів для транспортування вантажів у металургійному виробництві // Науковий вісник ДДМА. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – № 1 (25Е). – С. 17-23.
2. Ромасевич Ю.О. Аналіз пуску стрічкового конвеєра із використанням частотно-керованого привода // Машинобудування (Збірник наукових праць). – Харків, 2018. – № 21. – С. 82-90. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mashbud_2018_21_14
3. Стаднік М.І. Дослідження пуску стрічкових конвеєрів // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – Вінниця: ВНАУ. – № 3 (102). – 2018. – С. 98-104.
4. Ловейкін В., Ромасевич Ю., Шалатовська К., Науменко П. Оптиміальне керування рухом стрічкового конвеєра у перехідних режимах // Гірничі та піднімально-транспортні машини. – 2017. – Вип. 89. – С. 16-23. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbdmm_2017_89_4
5. Алексеев В.В., Козярук А.Е., Загивный Э.А. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования. – СПб., 2006. – 58 с.
6. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб: СПбЭТК, 2004. – 128 с.
7. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2006. – 304 с.
8. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

УДК 681.5

Шуляк О.О.

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

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ГОЛОВНОГО РУХУ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА

Одним з основних шляхів підвищення економічних показників народного господарства є широке впровадження у наукові дослідження, проектування та виробництво сучасних методів автоматизації та комп'ютеризації виробничих процесів.

Актуальність роботи пов'язана з тим, що від рівня розвитку верстатобудування в значній мірі залежить якісний і кількісний розвиток всієї машинобудівної промисловості. На даний час верстатобудівна промисловість здат-

на задовольнити більшість потреб споживачів, проте з кожним роком підвищуються технічні вимоги до технічних характеристик верстатів. Керуючими пристроями електроприводів є програмовані мікроконтролери і промислові комп'ютери, а алгоритми керування реалізуються у вигляді програм [1-3]. Висока швидкість обробки інформації дала поштовх до розвитку старих і розвитку нових алгоритмів керування різних систем побудови електроприводів металорізальних верстатів.

Автоматизація електроприводів металорізальних верстатів досліджується в багатьох наукових роботах. В [4] аналізуються питання підвищення продуктивності токарних верстатів при обробленні деталей малого діаметра шляхом керування їх динамічним станом в процесі оброблення, в [5] розглянуті питання експлуатації електроприводів на постійному і змінному струмах для універсальних верстатів і верстатів з ЧПК. В публікації [6] йдеться про те, що в сучасному машинобудуванні дуже широко впроваджуються високотехнологічні методи механічної обробки, що вимагає використання відповідного сучасного технологічного обладнання. Одним із надважливих етапів проектування сучасного технологічного обладнання, а саме металорізальних верстатів, є вибір оптимальної компоновки. Розгляду нових типів приводів робочих органів металорізальних верстатів з ЧПУ, виготовлених із застосуванням прямих мехатронних приводів присвячена робота [7]. Враховуючи інтенсивну динаміку досліджень останніх років щодо автоматизації електроприводів металорізальних верстатів та наявність нових технічних досягнень в цій сфері, питання сучасної автоматизації електропривода головного руху токарних верстатів залишаються остаточно не вирішеними.

Метою даної роботи є автоматизація електропривода головного руху токарного верстата та визначення показників якості керування розробленого автоматизованого електропривода.

Виклад основного матеріалу. Приводним двигуном електропривода головного руху токарного верстата модель 1730 є регульований постійного струму. Для живлення двигунів постійного струму незалежного збудження використовуються регульовані джерела живлення:

- електромашинні агрегати – генератор постійного струму – двигун змінного струму (система Г-Д);
- тиристорні перетворювачі (випрямлячі) з фазовим керуванням (система ТП-Д);
- напівпровідникові випрямлячі з регулюванням величини випрямленої напруги методом широтно-імпульсного регулювання (ШІР-Д).

Система генератор-двигун, в якій двигун постійного струму отримує живлення від електромашинного агрегату, на даний час є морально застарілою і в стаціонарних установках не застосовується. Система Г-Д продовжує використовуватись для мобільних установок, наприклад екскаваторів.

Основною системою регулювання електропривода з двигуном постійного струму є система «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» (ТП-Д), найбільш поширені схеми якої наведені на рис. 1.

Оснóву схем тиристорних перетворювачів становлять напівкеровані силові напівпровідникові прилади – тиристори. Неповна керованість тиристорів визначається тим, що вмикання тиристора контролюється системою імпульсно-фазового керування (СІФК) – при подачі відкриваючого імпульсу на керуючий електрод від відкривається і залишається відкритим після зняття відкриваючого імпульсу. Закриття тиристорів по колу керування неможливе. Сказане вище відноситься до одноопераційних тиристорів. Існують тиристори, які можна закривати по колу керування, проте ці прилади в систему ТП-Д поки що не застосовуються.

Функціональну схему автоматизованого електропривода головного руху токарного верстата показано на рис. 2. Під час розробки автоматизованого електропривода головного руху токарного верстата модель 1730 старий електродвигун 132М замінено на новий – МР132М потужністю 11 кВт з вбудованим тахогенератором, також, підібрано модель тиристорного перетворювача модель МДС2-11.

Дослідження перехідних режимів здійснювалось засобами комп'ютерного моделювання за розробленою структурною схемою автоматизованого електропривода головного руху токарного верстата. Результати імітаційного моделювання перехідного процесу за швидкістю зображено на рис. 3.

Аналіз визначених показників якості керування свідчить про те, що система є стійкою. Для заданих числових значень параметрів налаштування регулятора швидкості перерегулювання становить 6,47 %, час перехідного процесу складає 1,5 с. Інші параметри перехідної характеристики показані на самому рис. 3.

Висновки. В роботі автоматизовано електропривод головного руху напівавтоматичного багаторізцевого токарного верстата модель 1730. Використано систему керування електроприводом з тиристорним перетворювачем МДС2. В системі використано новий двигун МР132М потужністю 11 кВт та тиристорний перетворювач модель МДС2-11. Побудовано імітаційну модель для дослідження перехідних процесів системи, встановлено основні показники якості керування: перерегулювання 6,47 % і час перехідного процесу 1,5 с.

Список використаних джерел

1. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2006. – 304 с.
2. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
3. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. [Текст] / И.В. Мирошник. СПб.: Питер, 2005. – 336 с.

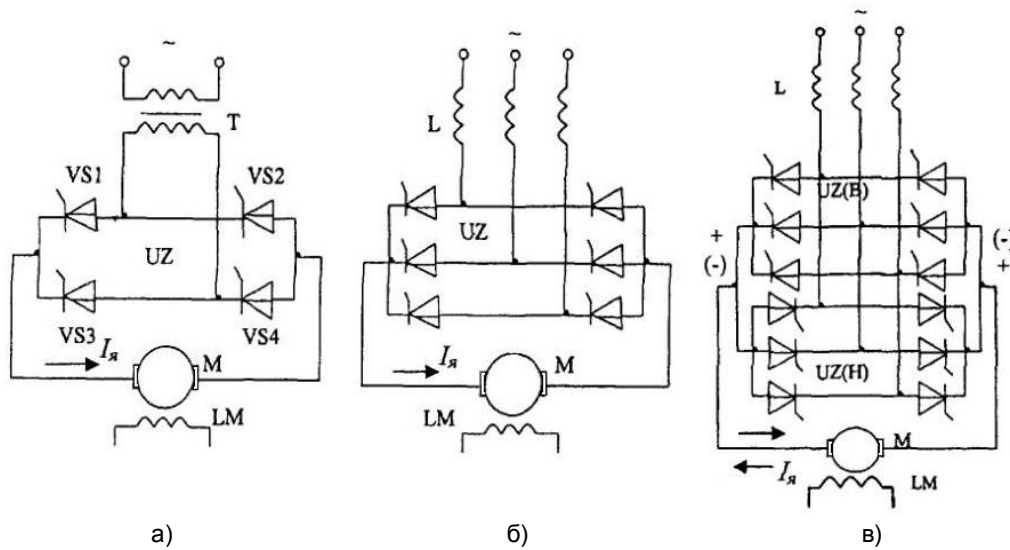


Рисунок 1 – Силові схеми електроприводів «тиристорний перетворювач – двигун»:

а) – однофазна мостова нереверсивна; б) – трифазна мостова нереверсивна;

в) – трифазна мостова зустрічно-паралельна реверсивна

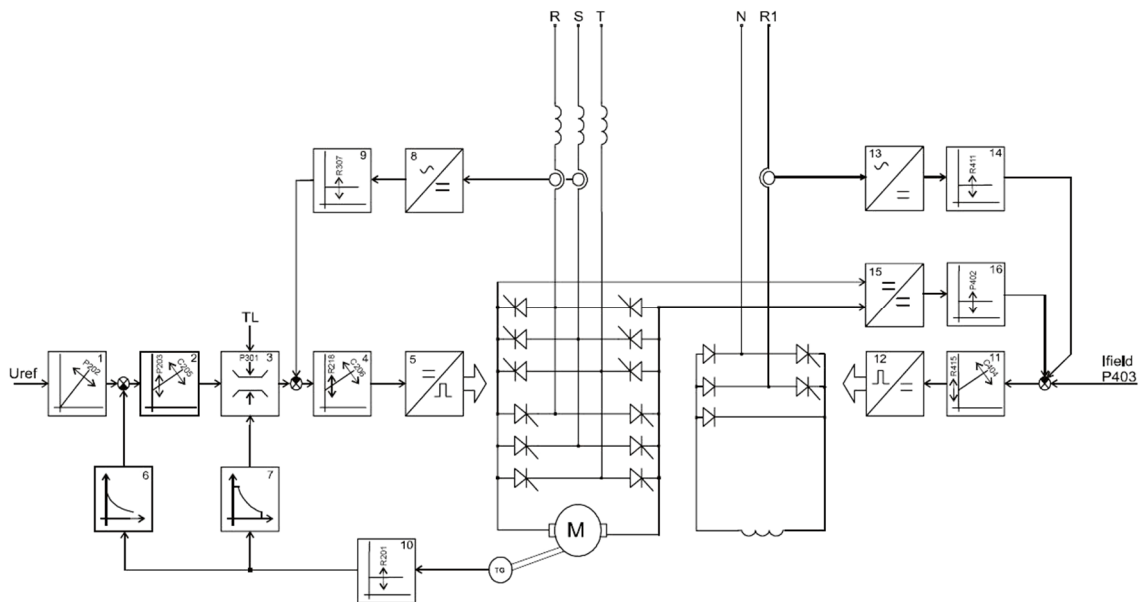


Рисунок 2 – Функціональна схема тиристорного електропривода MDC2

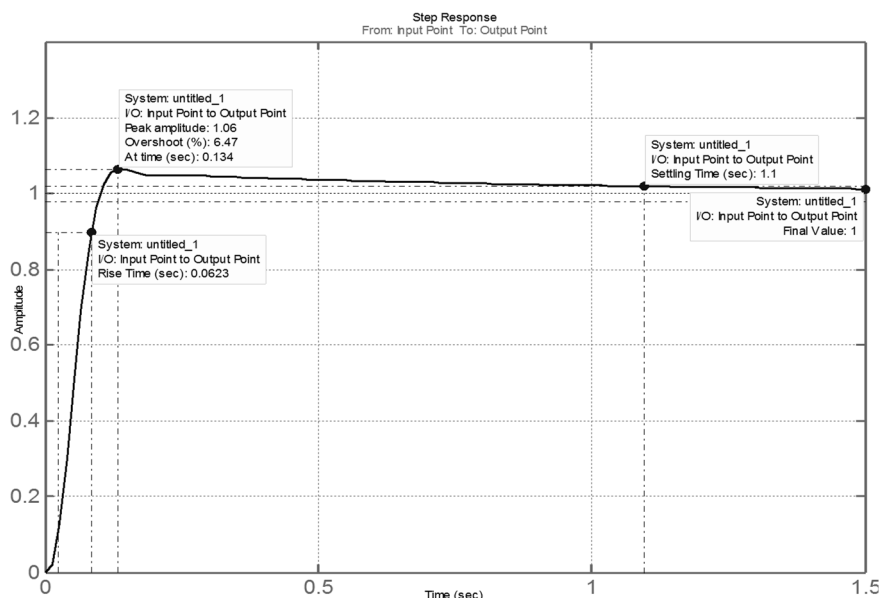


Рисунок 3 – Перехідна характеристика автоматизованого електропривода головного руху токарного верстата

4. Шаповал Ю.В., Залога В.О. Підвищення ефективності і оброблення деталей шляхом керування динамікою процесу точіння з високими частотами обертання шпинделя // Вісник ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2017. – № 2 (80). – С. 175-184.

5. Розман Я.Б., Брейтер Б.З. Устройство, наладка и эксплуатация электроприводов металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1985. – 208 с.

6. Боберецький Т.І., Дмитришин П.Р. Компонувки металорізальних верстатів // Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – Том. 1. – С. 50.

7. Стародубов В.С. Мехатронные приводы в металлорежущих станках с ЧПУ // Известия высших учебных заведений. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – № 5. – С. 72-79.

УДК 621.314.2

Зайченковський О.Є.

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

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОРІЄНТАЦІЇ ГОНДОЛИ ВІТРОГЕНЕРАТОРА

В даний час запаси органічного палива виснажуються і його використання у всезростаючих обсягах веде до забруднення навколишнього середовища стало загальним. Виділення вуглекислого газу, що призводить до глобального потепління. В майбутньому неминуче скорочення споживання органічного палива і його заміна іншими джерелами енергії. Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) найбільш привабливо, так як воно не порушує природного балансу енергії, одержуваної нашою планетою. До ВДЕ відносяться: сонячна енергія, енергія вітру, енергія річок, припливів і океанських хвиль, енергія, укладена в біомасі та органічних відходах. Для України перспективним є використання вітроенергетичних ресурсів [1].

Метою роботи є дослідження формування алгоритмів керування системи орієнтації гондоли вітрогенератора.

При проектуванні вітроелектричних установок треба враховувати такі їх особливості:

- для забезпечення максимальної ефективності роботи вітроколеса слід змінювати частоту його обертання при зміні швидкості вітру, зберігаючи постійним коефіцієнт швидкохідності, в той же час для максимально ефективної роботи електрогенератора необхідна практично постійна частота обертання;

- механічні системи управління частотою обертання вітротурбіни досить складні і дорогі. Набагато ефективніше і дешевше керувати частотою його обертання, змінюючи електричне навантаження електрогенератора;

- оптимальна частота обертання вітротурбіни тим менше, чим більше його радіус, тому тільки дуже малі вітроколеса (радіусом не більше 2 м) вдається поєднувати з генератором безпосередньо. При великих розмірах вітротурбіни доводиться використовувати підвищувальні редуктори, які здорожують вітроустановку і її обслуговування. Альтернативою редукторів можуть стати нові типи багатополюсних генераторів, що працюють при менших частотах обертання;

- в конструкції вітроелектричної установки передбачається, як правило, можливість відключення генератора від вітротурбіни і обертання його від хімічного або механічного акумулятора енергії, тому систему управління генератором не пов'язують з роботою вітротурбіни. При відсутності такого зв'язку навіть при "м'якому" з'єднанні генератора з вітротурбіною необхідні спеціальні пристрої, що демпфують, для того щоб виключити механічні удари, перевантаження і кидки напруг на виході генератора.

На рисунку 1 представлено вітрогенератор з горизонтальною віссю. Такий тип вітрогенератора є найбільш розповсюдженим, завдяки можливості порівняно хорошого регулювання числа оборотів [2].



Рисунок 1 – Загальний вигляд вітрогенератора

В даній системі найбільш доцільним засобом керування частотно-регульованого асинхронного електропривода є векторне керування.

Векторне керування - метод керування електродвигунами змінного струму, який дозволяє незалежно і практично безінерційно регулювати швидкість обертання і момент на валу електродвигуна. Головна ідея векторного керування полягає в тому, щоб контролювати не тільки величину і частоту напруги живлення, але і фазу. Іншими словами, контролюється величина і кут просторового вектора [3].

Векторне керування в порівнянні зі скалярним володіє вищою продуктивністю. Переваги векторного керування: висока точність регулювання швидкості; плавний старт і плавне обертання двигуна у всьому діапазоні частот; швидка реакція на зміну навантаження: при зміні навантаження практично не відбувається зміни швидкості; збільшений діапазон управління і точність регулювання; знижуються втрати на нагрів і намагнічування, підвищується ККД електродвигуна. До недоліків векторного керування можна віднести: необхідність завдання параметрів електродвигуна; великі коливання швидкості при постійному навантаженні; велика обчислювальна складність.

На рисунку 2 наведена функціональна схема автоматизованого електропривода регулювання положення при живленні двигуна від перетворювача частоти на основі автономного інвертора напруги з керуванням по вектору потокозчеплення ротора двигуна. Схема має такі позначення: ЗП – заїдаючий пристрій, який служить для більш плавного розгону; РП – регулятор потокозчеплення; РШ – регулятор швидкості; РС – регулятор струму; БК – блок керування; КП – керуючий перетворювач; ПФ – перетворювач фази; ПЧ – перетворювач частоти; ДС – датчик струму; БП – блок виміру потокозчеплення; АД – асинхронний двигун; ДП – датчик положення (енкодер). Система має два зовнішніх контура регулювання-модуля вектора потокозчеплення ротора і положення, а також два підлеглих їм внутрішніх контурів регулювання складових струму статора I_{1x} та I_{1y} ортогональний системі координат, що обертається із синхронною швидкістю поля двигуна. Система здійснює незалежне регу-

лювання модуля вектора потокозчеплення ротора і швидкості при збереженні прямої пропорційності між моментом двигуна і складовою сили, що намагнічує статор, перпендикулярній вектору потокозчеплення ротора [4].

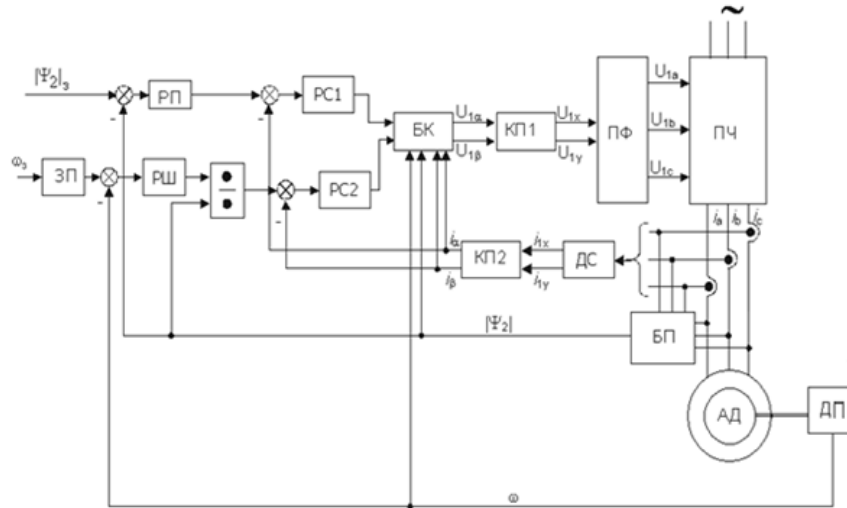


Рисунок 2 – Функціональна схема автоматизованого електроприводу

На базі функціональної схеми автоматизованого електропривода, було побудовано структурну схему, яка показана на рисунку 3, при використанні якої розглянуто динаміку моделі автоматизованого електропривода за допомогою MATLAB. Отримано перехідні характеристики. Аналіз якості керування показав, що автоматизований електропривод має динамічні показники, які цілком задовольняють вимогам [5].

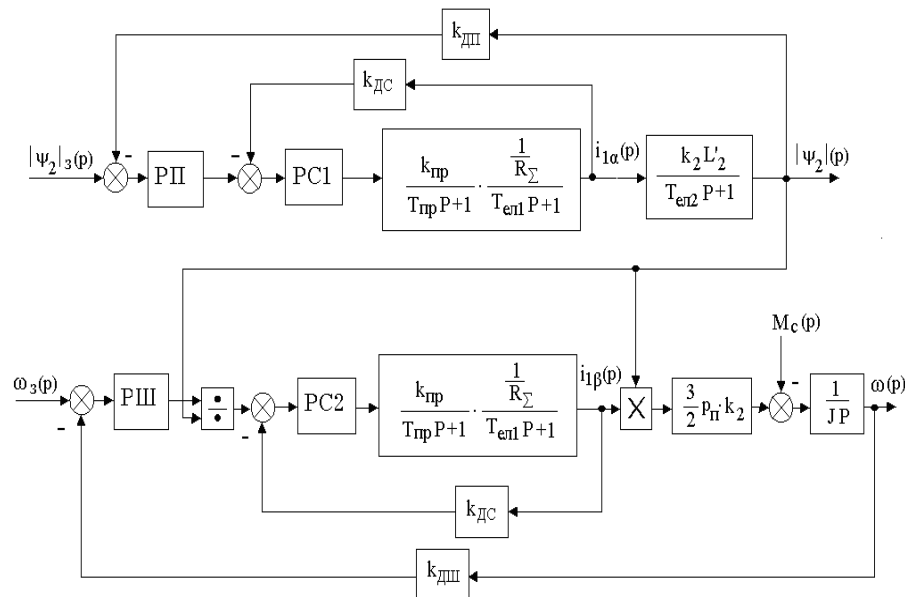


Рисунок 3 – Структурна схема автоматизованого електропривода

В результаті моделювання за допомогою пакета програми MATLAB були отримані перехідні характеристики, які представлені на рисунку 4.

Висновки: Задля забезпечення максимальної ефективності роботи вітроколеса слід орієнтувати його за напрямком вітру, в залежності від напрямку вітру буде підвищуватися ефективність. Найбільш ефективним методом керування системою орієнтації є використання електропривода, відносно від, наприклад, гідравлічних систем та пневматичних. Електропривод є найбільш точним, стабільним та плавним у керуванні.

При використанні електропривода орієнтації, доцільно залучити систему векторного керування, яка дозволить зменшити витрати електроенергії на привід і забезпечити високу точність системи. Використання векторного

керування є менш енергоємною, а саме використання частотного регульованого електропривода на 30 – 50% знижує енерговитрати.

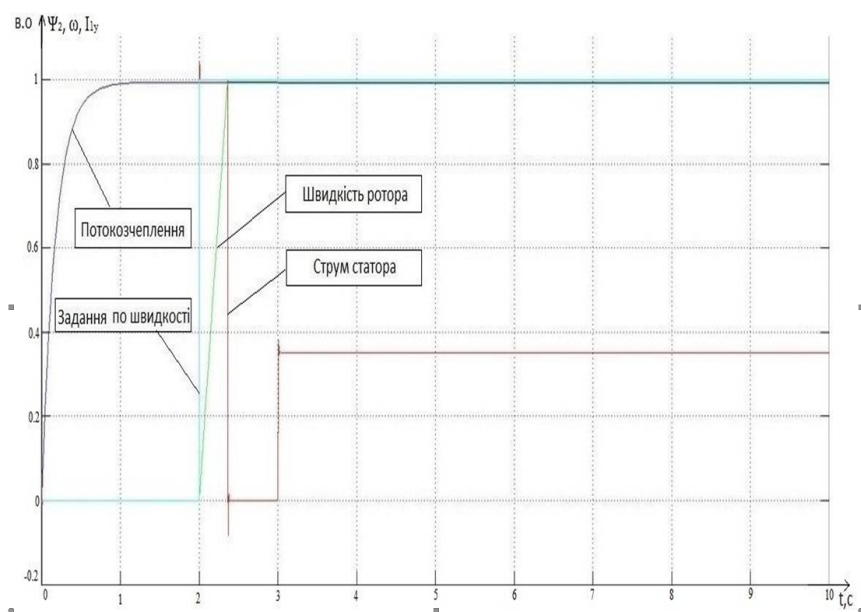


Рисунок 4 – Перехідні характеристики автоматизованого електропривода

В ході виконання роботи, було проведено математичне моделювання, на основі сформованої динамічної структурної схеми. На основі проведеного аналізу, були отримані перехідні характеристики автоматизованого електропривода, які повністю задовольняють поставленим завданням.

Список використаних джерел

1. Городов Р.В., Губин В.Е., Матвеев А.С. Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 294 с
2. Харітонов В.П. Автономні вітроелектричні установки – М: ГНУВНЕСХ, 2006-280 с.
3. Віддаленого доступу: Векторне керування асинхронними двигунами URL: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/> (дата звернення: 27.09.2020).
4. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. Учебное пособие. – СПб ГУ ИТМО, 2011. – 131 с.
5. Афонин С.М. Многомерная структурно-параметрическая модель составного производителя наноперемещений / Вестник машиностроения, 2007. - №1. – с. 3-13.

СЕКЦІЯ 3. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ

УДК 662.769.2

Нагорний А. К., здобувач в.о. 2 курсу
Криворізький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОГО ГОСПОДАРСТВА

Використання водню шляхом його спалювання є абсолютно екологічно безпечним, оскільки при цьому нічого, крім води, не утворюється. Якби водень був так само доступний, як і природний газ, він би й справді став ідеальним паливом, яке не забруднює довкілля. Однак реальні промислові методи одержання водню базуються або на генеруванні його з інших видів органічного палива (природний газ, продукти нафтопереробки), або на електролізі води.

Передача електроенергії традиційною системою електропостачання має великі затрати: вона становить близько третини собівартості енергії для споживача. Щоб знизити витрати, будують лінії електропередач все більш високої напруги. Але повітряні високовольтні лінії вимагають відчуження великої земельної площі, до того ж вони уразливі для сильних вітрів та інших метеорологічних чинників. А підземні кабельні лінії обходяться у 10-20 разів дорожче і їх прокладають лише у виняткових випадках (наприклад, коли це викликано потребами архітектури або надійності).

Метою роботи є аналіз сучасних систем інтеграції водневої галузі в енергетичне господарство та визначення основних напрямів їх розвитку.

З розвитком альтернативної енергетики, серйозною проблемою є накопичення і зберігання електроенергії, оскільки електростанції найбільш ефективно працюють за умов постійної потужності і повного навантаження. Тим часом попит на електроенергію змінюється протягом доби, тижня і року, тому електростанціям доводиться до нього пристосовувати. Єдину можливість зберігати велику кількість електроенергії сьогодні дають гідроакмулюючі електростанції, але й вони, у свою чергу, створюють безліч проблем. Усі ці проблеми могло б вирішити використання водню як палива і створення так званого водневого енергетичного господарства.

Водень – найпростіший і найлегший з усіх хімічних елементів. Його можна вважати ідеальним паливом, адже він є усюди, де є вода. При спалюванні водню утворюється вода, яку можна знову розкласти на водень і кисень, причому цей процес не забруднює навколишнє середовище. Водневе полум'я не виділяє в атмосферу продуктів, якими неминуче супроводжується горіння будь-яких інших видів палива: вуглекислого газу, окису вуглецю, сірчистого газу, вуглеводнів, золи, органічних перекисів тощо. Водень має дуже високу теплотворну здатність: при спалюванні 1 г водню утворюється 120 Дж теплової енергії, а при спалюванні 1 г бензину – тільки 47 Дж.

Водень можна транспортувати і розподіляти трубопроводами так само, як природний газ. Трубопровідний транспорт палива – найдешевший спосіб дальньої передачі енергії. До того ж, трубопроводи прокладаються під землею, що не порушує природного ландшафту, і займають менше земельної площі, ніж повітряні електричні лінії. Передача енергії у формі газоподібного водню трубопроводом діаметром 750 мм на відстань понад 80 км коштуватиме дешевше, ніж передача тієї ж кількості енергії у формі змінного струму підземним кабелем.

Водень – синтетичне паливо. Його можна отримувати з вугілля, нафти, природного газу або шляхом розкладання води. Згідно з оцінками, сьогодні у світі споживають близько 20 млн т водню на рік. Половина цієї кількості витрачається на виробництво аміаку і добрив, а інша – на видалення сірки з газоподібного палива, в металургії, для гідрогенізації вугілля та інших палив. У сучасній економіці водень залишається швидше хімічною, ніж енергетичною сировиною.

Зараз водень отримують головним чином (близько 80 %) з нафти. Але це неекономічний для енергетики процес, тому що енергія з такого водню коштує у 3,5 разів дорожче, ніж енергія від спалювання бензину. До того ж собівартість такого водню постійно зростає у міру підвищення цін на нафту.

Незначну кількість водню отримують шляхом електролізу. Виробництво водню методом електролізу води коштує дорожче, ніж вироблення його з нафти, але з розвитком атомної енергетики ця ціна впаде. Поблизу атомних електростанцій можна розмістити станції електролізу води, де вся енергія, вироблена електростанцією, піде на розкладання води з утворенням водню. Правда, ціна електролітичного водню залишиться вищою за ціну електричного струму, проте витрати на транспортування і розподіл водню настільки малі, що остаточна ціна для споживача буде цілком прийнятною порівняно з ціною на електроенергію.

Сьогодні дослідники інтенсивно працюють над здешевленням технологічних процесів великотоннажного виробництва водню за рахунок ефективнішого розкладання води, використовуючи високотемпературний електроліз водяної пари, застосовуючи каталізатори тощо. Коли водень стане таким же доступним паливом, як сьогодні природний газ, він зможе усюди його замінити. Водень можна буде спалювати в кухонних плитах, у водонагрівачах і опалювальних печах, забезпечених пальниками, які майже або зовсім не відрізнятимуться від сучасних пальників, вживаних для спалювання природного газу.

Оскільки при спалюванні водню не залишається жодних шкідливих продуктів згоряння, то зникає потреба у системах відведення цих продуктів для опалювальних пристроїв, що працюють на водні. Більш того, водяну пару, що утворюється при горінні, можна вважати корисним продуктом - вона зволожує повітря (а як відомо, в сучасних квартирах з центральним опалюванням повітря дуже сухе). А відсутність димарів не тільки сприяє економії будівельних витрат, а й підвищує ККД опалювання на 30 %. Крім того, водень може стати й хімічною сировиною у багатьох галузях промисловості, наприклад, при виробництві добрив і продуктів харчування, в металургії і нафтохімії. Його можна використовувати і для вироблення електроенергії на місцевих теплових електростанціях.

Тобто воднева енергетика - це спосіб уникнення будь-яких токсичних викидів безпосередньо у місці вивільнення енергії.

Розвиток водневої енергетики стимулював дослідження у галузі паливних елементів. Паливний елемент (ПЕ) - це електрохімічний генератор, який забезпечує пряме перетворення хімічної енергії на електричну (рис.1). Такі перетворення відбуваються і у звичних електричних акумуляторах. Однак паливні елементи мають дві важливі відмінності: по-перше, вони функціонують доти, доки паливо (відновник) та окисник надходять із зовнішнього джерела; по-друге, хімічний склад електроліту в процесі роботи не змінюється, тобто паливний елемент не треба перезаряджати.

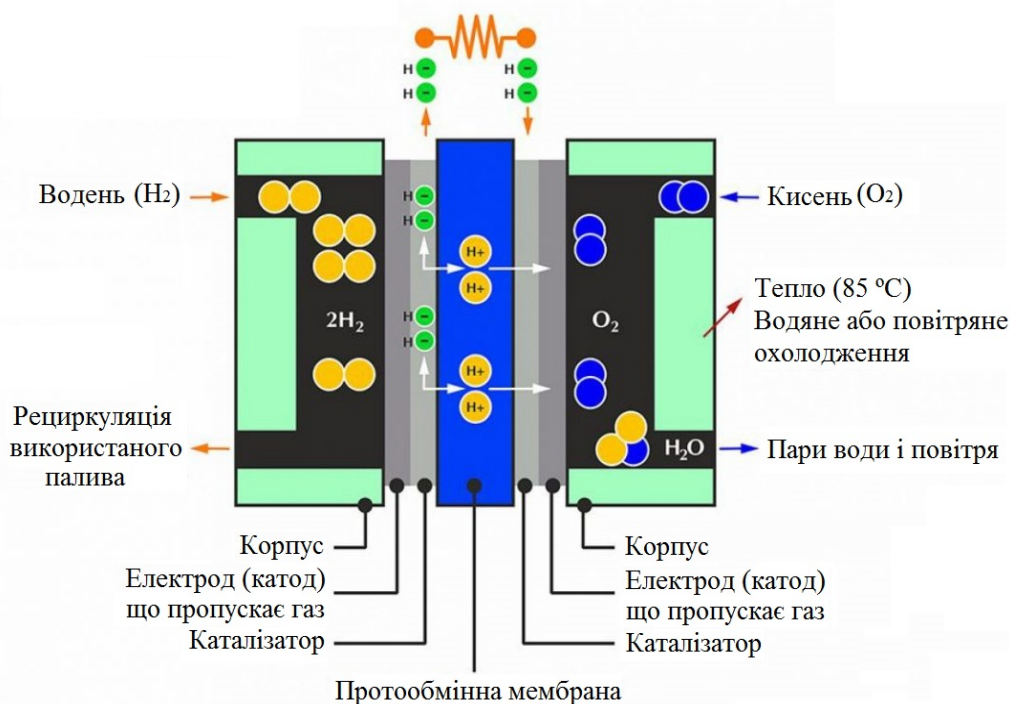


Рис. 1. Схема паливної комірки

Сьогодні технічно і технологічно добре опрацьовані методи газифікації вугілля, а це означає, що ПЕ можливо включити і до ланцюгів виробництва електроенергії з твердого викопного палива. Таким чином, широке впровадження паливних елементів дасть змогу не тільки знизити темпи витрачання запасів газу, нафти і вугілля, а й значно зменшити забруднення довкілля.

Заслужують на увагу проекти щодо комплексного використання атомної і водневої технологій. Однією з проблем уранового ядерного циклу під впливом повільних, а тим більше швидких, нейтронів є ефективне відбирання тепла, необхідного, крім іншого, для усунення небезпеки некерованого продовження процесу. Атомна технологія має значні недоліки порівняно, наприклад, із гідроенергетикою, не передбачає оперативне регулювання відбирання енергії. Пропозиції щодо використання тепла першого парового контуру для електролізу води і накопичення водню і кисню перед паливним елементом, як і пропозиція використання тепла у першому гелієвому циклі для конверсії метану і накопичення синтез-газу, малоперспективні. Водночас розвиток ідей, що включають справді комплексну технологію, за якою процес конверсії відбувається безпосередньо в активній зоні ядерного реактора, дозволяє сподіватись, що буде вирішене й питання максимально безпечного та ефективного керування процесом.

Отже, водень можна вважати паливом майбутнього. У багатьох країнах світу дослідження з водневої енергетики є пріоритетними напрямками розвитку науки. Вони забезпечуються фінансовою підтримкою і держави, і бізнесових структур. Основною метою розвитку водневих технологій є зниження залежності від традиційних енергоносіїв – нафти, газу і вугілля. Ключовою умовою переходу до водневої енергетики є пошук і створення надійних та економічно доцільних паливних елементів на основі водню.

Основною перевагою використання відновних джерел енергії (ВДЕ) є їхня невичерпність та екологічна чистота, що сприяє поліпшенню екологічного стану і не призводить до зміни енергетичного балансу планети. Дослідження, виконані під егідою ООН, демонструють, що частка ВДЕ у світовому балансі споживання первинних енергоресурсів до 2050 р. становитиме близько 50 %. Водна енергетика буде споживати електроенергію що виробляється ВДЕ, а вже потім, у реальному часі, запаси водню будуть використовуватися як паливо для ТЕС і ТЕЦ. Таким чином, буде здійснюватися регулювання балансу між виробленою та спожитою електроенергією.

Висновки. Електроенергетика України може бути тісно поєднана із розвитком водневої енергетики, що стане не тільки новим фактором розвитку електротехнічної галузі, проте і забезпечить вирішення проблематики мінливого характеру генерації ВДЕ, частка якого буде з кожним роком збільшуватися у загальній структурі вироблення електроенергії. Саме воднева енергетика може стати у майбутньому основним засобом для акумулювання електроенергії. Воднева енергетика екологічно безпечна та стратегічно вигідна з точки зору природничих запасів та концепції сталого розвитку держави. Попри усі переваги, залишається невирішеним ряд проблем:

1. Пошук оптимального способу отримання водню, що буде гарантувати безпеку експлуатації.
2. Спосіб зберігання та транспортування водню за умови відсутності трубопроводів.
3. Управління паливною коміркою у реальному часі за умови дефіциту електроенергії у загальному балансі виробництва електроенергії.
4. Висока вартість елементів каталізаторів та супутнього обладнання для їх виробництва.

Список літератури

1. Кириленко О. В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови / О. В. Кириленко, А. В. Праховник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. : спеціальний випуск. – К. – 2010. – С. 10–16.
2. Підвищення ефективності відновлення та експлуатації малих ГЕС / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик // Відновлювана енергетика XXI століття: матеріали X міжнарод. наук.- практ. конференції. – Крим, 2009.– С. 305–308.
3. Лежнюк П. Д. Особливості роботи відновлюваних джерел енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, В. В. Кулик // Відновлювана енергетика XXI століття : матеріали XII міжнарод. наук.- практ. конференції. – Крим, 2011.– С. 42–46.
4. Буцьо З. Ю. Мала гідроенергетика: світовий досвід і перспективи розвитку в Україні / З. Ю. Буцьо, Л. М. Луцьок, О. В. Гаврюк // Електропанорама. – 2011. – № 6. – С. 47–51.
5. Bhatti T.S. Small Hydro Power Systems / T.S. Bhatti, R.C. Bansal, D.P. Kothari. – New York : Dhanpat Rai & Sons, 2004. – 446 p.
6. Артюх С. Ф. Сучасний стан проблеми і перспективи малої енергетики України / С. Ф. Артюх // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 6. – С. 102–108.
7. Стимулювання відновлюваної енергетики в Україні за допомогою «зеленого» тарифу : посібник для інвесторів // Консультативна програма IFC в Європі та Центральній Азії –Режим доступу: GT_Guide_19032013_UKR.pdf.
8. Кузьмін І. В. Критерії оцінки ефективності, якості та оптимальності складних систем. / І. В. Кузьмін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. –№ 1. – С. 5–10.
9. Федоренко Г.М. Підвищення надійності та ефективності експлуатації гідроагрегатів ГЕС і ГАЕС / Г. М. Федоренко, В. О. Саратов // Праці Інституту електродинаміки НАН України: – К. : ІЕД НАНУ. – 2006. – № 2(11), ч. 2 – С. 79–82.
10. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. – К.: НАНУ, Інститут електродинаміки, Державний комітет України з енергозбереження, 2001.
11. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: Навчальний посібник / О.І. Соловей, Ю.Г. Лега, В.П. Розен, О.О. Ситник, А.В. Чернявський, Г.В. Курбака; За заг. Ред. О.І. Солов'я – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – С. 483.
12. Bostan I. Resilient energy systems. Renewables: Wind, Solar, Hydro / Ion Bostan, Adrian Gheorghe, Valeriu Dulgheru et al. – Springer Science+Business Media B.V., 2013. – P. 507.
13. Елистратов В.В. Использование возобновляемой энергии: учеб. Пособие / В.В. Елистратов. – Спб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2008 – С. 224
14. Вітроенергетика та енергетична стратегія / О. Ф. Оніпко, Б. П. Коробко, В. М. Мханюк. — К. : УАН, Фенікс, 2008. — 168 с.

УДК 621.314.26

Рибін В.О., Ситніков А.О., магістранти, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Науковий керівник к.т.н. Авдєєва О.А.

ТЕНДЕНЦІЇ ЗАСТОСУВАННЯ АМОРФНИХ СПЛАВІВ В МАГНІТОПРОВОДАХ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Індукційні статичні пристрої є важливими елементами різноманітних електротехнічних систем і комплексів. Тому важливим і актуальним питанням сьогодення є збереження енергетичних і матеріальних ресурсів при виробництві і експлуатації вказаних пристроїв [1]. До вказаних пристроїв відносяться трифазні трансформатори, які є невід'ємною складовою систем електропостачання споживачів усіх категорій.

Підвищення коефіцієнту корисної дії, зниження вартості та зменшення габаритних розмірів трансформатора є актуальною задачею, яка поставлена в сучасних умовах подорожчання електроенергії [2].

Метою роботи є аналіз сучасних тенденцій підвищення енергоефективності силових трансформаторів.

В рамках сформованої задачі існують пропозиції щодо обмеження обороту енергетичних пристроїв, які характеризуються неефективним використанням енергоресурсів. Одна з таких пропозицій – заміна розподільних трансформаторів з магнітопроводами з анізотропної електротехнічної сталі, що відпрацювали заданий ресурс, на енергоефективні трансформатори нових розробок.

До енергоефективних трансформаторів відносять трансформатори з використанням аморфних сплавів в магнітопроводах.

Аморфний сплав – це певний вид прецизійного сплаву. Його відмінною характеристикою від сплавів кристалічної структури є цілий комплекс фізичних і хімічних властивостей. Одним з основних відмінностей аморфного сплаву від електротехнічної сталі – відсутність періодичності в розташуванні атомів. А також ці сплави відрізняються від кристалічних сплавів більшою стійкістю до корозії, вони міцніші в кілька разів і мають суттєво знижені питомі втрати [3].

В теперішній час для використання в електротехнічних пристроях найбільшого поширення набули аморфні сплави на основі металів перехідної групи залізо - нікель - кобальт (Fe; Ni; Co), які взаємодіють з металоїдами бор - кремній - вуглець (B; Si; C), що знижують температуру плавлення і забезпечують більш легке досягнення температури склування аморфного сплаву при його охолодженні. В результаті зникають міждоменні кордони, що призводить до високої твердості, міцності і корозійної стійкості таких матеріалів.

Аморфний стан досягається підбором хімічного складу сплаву і використанням спеціальної технології надшвидкого охолодження зі швидкістю вище критичної, для чого вихідний розплав виливається на диски, які швидко обертаються (рис. 1). При попаданні на поверхню диска розплав охолоджується зі швидкістю близько 10⁶ К/с і перетворюється в стрічку товщиною від 15 до 60 мкм, має аморфну структуру, аналогічну структурі скла. Стрічка навивається в кільцеві, U-образні осердя або формується у вигляді стрижнів. Технологія навивки дозволяє отримувати осердя з діаметром від декількох міліметрів до 500 мм.

Надання матеріалами специфічних властивостей (наприклад, петля гістерезису певної форми) досягається термо- або термоманітною обробкою, в результаті якої структура стрічки може залишитися аморфною, стати частково кристалізованою або нанокристалічною.

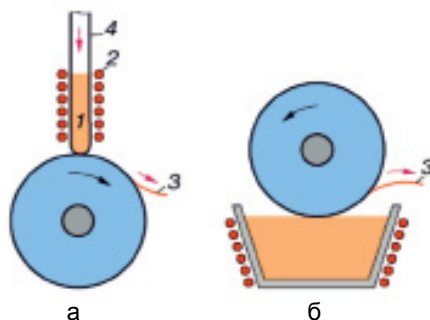


Рисунок 1 – Схеми пристроїв для отримання аморфних сплавів загартуванням з рідкого стану: а – нанесення розплаву на металевий диск або циліндр, що обертається; б – витяг розплаву обертовим диском:

1 - розплав; 2 - нагрівальний пристрій (індукційна піч); 3 - стрічка аморфного сплаву; кварцова трубка.

На рис. 2 як приклад представлені петлі гістерезису аморфного сплаву АМЕТ-2НСП типу Т (з лінійної петлею гістерезису) [4].

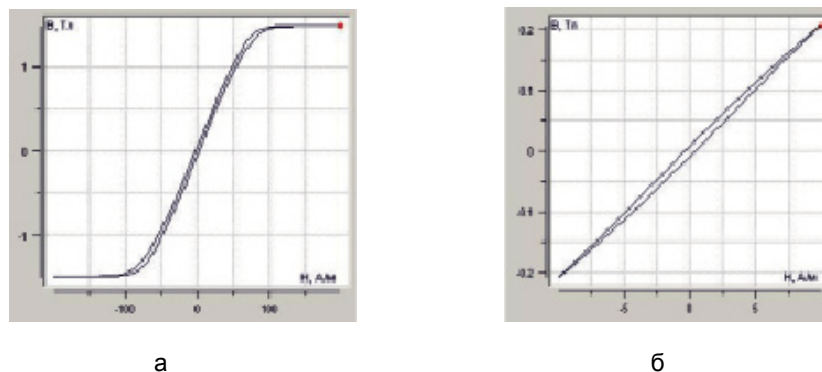


Рисунок 2 – Петлі гістерезису сплаву 2HCP (тип Т): а – гранична петля; б – часткова петля при індукції 0,2 Тл.

Особливістю нанокристалічних сплавів є їх надмілкокристалічна структура. Розмір кристалів (наночастинок) в цих сплавах становить від 1 до 10 нм. Нанокристалічні і аморфні сплави за своїми властивостями багато в чому схожі. По - перше, вони мають структурну схожість. Як відомо, структура аморфних сплавів має ближній порядок, тобто складається з упорядкованих мікрогруп атомів, розміри яких близькі до розмірів нанозерен нанокристалічних сплавів. По - друге, це технологія отримання. В даний час найбільш поширеним методом отримання наноструктури є регульована кристалізація з вихідного аморфного стану. Таким чином, «материнською» основою нанокристалічного сплаву є сплав аморфний. Структура нанокристалічного сплаву являє собою двофазну систему, однією з фаз якої є нанокристали, а іншою - залишкова аморфна матриця.

Навантажувальні втрати в трансформаторах залежно від збільшення навантажень варіативні, в той час як втрати неробочого руху мають постійну величину. Ключ до вирішення проблеми втрати енергії - зниження втрат неробочого руху [5].

Для зниження втрат неробочого руху в магнітопроводах силових трансформаторів застосовують складену уп'ятеро стрічку з аморфного сплаву типу Fe78B13Si9.

За даними американської компанії Metglas втрати за рік в силових трансформаторах розподільних мереж, в яких використовуються магнітопроводи з електротехнічної сталі, складають близько 8% їх закупівельної вартості.

Як відомо з [6], використання в магнітопроводах аморфних матеріалів, замість традиційної трансформаторної сталі дозволяє скоротити втрати неробочого руху в 4-5 разів. Енергоефективні розподільні трансформатори з магнітопроводами з нанокристалічних матеріалів, за даними енергетичних компаній США і Японії, окупаються у покупця приблизно за три роки [7].

Крім зниження втрат в магнітопроводі з нанокристалічних сплавів також зменшується значення струму намагнічування. В результаті при зниженні втрат неробочого руху і зниженні струму намагнічування в трансформаторах:

1) знижується температура трансформатора і продовжується його термін служби;

2) в кілька разів знижуються витрати при передачі електроенергії споживачу;

3) має місце загальне скорочення енергоспоживання в енергетиці країни, як результат досягається загальне істотне зниження обсягу спалювання органічного палива для вироблення електроенергії і шкідливих викидів в атмосферу.

За кордоном перші розподільні трансформатори потужністю 630 – 1000 кВА з аморфним осердям були виготовлені понад 15 років тому. В даному напрямку більш всіх просунулися США, Китай і Індія. Починаючи з 2009 року, ряд європейських компаній також встановили в досвідну експлуатацію кілька трансформаторів потужністю 400 кВА з осердям з аморфної стрічки. У 2012 році в Росії до випуску силових трансформаторів з аморфними осердями АТМГ приступили групи «Трансформер» і «Золотий трикутник» (рис. 3) [8, 9].

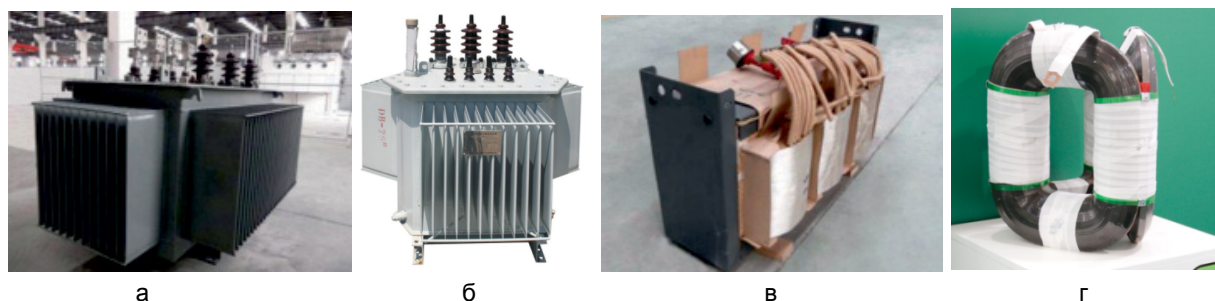


Рисунок 3 – Трансформатори АТМГ «Трансформер» і «Золотий трикутник»: а, б – зовнішні вигляди; в, г – електромагнітні системи.

Висновки. 1. Проведений аналіз показав, що трансформатори з магнітопроводами з аморфних сплавів, більш енергоефективні, ніж трансформатори з традиційними магнітопроводами з анізотропних електротехнічних сталей. 2. Необхідно нарощувати виробництво аморфних сплавів і здійснювати поступовий перехід на застосування їх в магнітопроводах сучасних трансформаторів різного призначення. 3. Подальше вивчення властивостей аморфних сплавів дозволить визначити доцільність їх застосування не тільки в статичних електромагнітних пристроях, але й в електромагнітних системах електричних машин при подоланні недоліку крихкості.

Разом з тим, залишається відсутнім аналітичне порівняння, яке дозволить оцінити вплив на основні показники технічного рівня заміни в магнітопроводах силових трансформаторів анізотропної електротехнічної сталі на аморфну. В зв'язку з цим актуальною задачею подальших досліджень вважається визначення методу вказаного аналітичного порівняльного аналізу та його застосування на прикладі трансформатора конкретного технічного завдання. З аналізу літератури визначено, що метод, який дозволить виконати вказаний аналітичний порівняльний аналіз варіантів проектних розробок трансформатора описано в [10].

Список використаних джерел

1. Иванов-Смоленский, А.В. Перспективы развития электромеханики в XXI веке / А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина [и др.] // Электропанорама. – 2001. – №1. – с. 14-15.
2. Ставинский, А.А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики / А.А. Ставинский // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №1. – с. 57-61.
3. Аморфные сплавы и экономия // Энергетика, оборудование, документация// URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-i-ekonomiya.html>
4. В.И. Печенкин, к.т.н., руководитель НИОКР группы «Трансформер»// «Силовые «аморфные» трансформаторы. Будущее в настоящем» // Рекламно-информационный журнал «Электротехнический рынок» № 5–6 (47–48) Сентябрь–Декабрь 2012; URL: <http://market.elec.ru/nomer/44/silovye-amorfnye-transformatory-budushee-v-nastoya/>
5. Каталог продукции Открытого акционерного общества «Ашинский металлургический завод» // Магнітопроводи из аморфных сплавов // URL: <http://www.amet.ru/buyers/product/amorf>
6. Компании Metglas Inc.(США), HEINRICH GEORG GmbH MASCHINENFABRIK (Германия), ФГУП ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина «Энергосберегающие трансформаторы с магнітопроводами из аморфных сплавов»// материал VI Международной конференции ТРАВЭК «Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности», Москва, 17–18 марта 2010 года. URL: <http://ukrm.ru/content/view>
7. Трансформаторы с аморфным магнітопроводом// Энергетика, оборудование, документация // URL: <http://forca.ru/stati/podstancii/transformatory-s-amorfny-magnitoprovodom.htm>
8. Энергосбережение в Европе: применение энергоэффективных распределительных трансформаторов. Публикация Европейского института меди. Проект № STR -1678-98-BE. Энергосбережение № 6/2003. URL: http://tgv.khstu.ru/lib/artic/energy/2003/6/5/6_5.html
9. Инновационный прорыв на рынке силовых трансформаторов. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/articles/innovacionnyj-proryv-na-rynke-silovyh-transformato/>
10. Ставинский, А.А. Метод сравнительного анализа статических электромагнитных систем, отличающихся структурой и конфигурацией элементов / А.А. Ставинский, Р.А. Ставинский, Е.А. Авдеева // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – №14(90). – с. 53-60.

УДК 621.314.26

Бугайов Д.С., Голік С.Є., Тарасюк Г.П. магістранти, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв
Науковий керівник к.т.н. Авдеева О.А.

АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ КОМПЛЕКТАЦІЙ ОПУСКНИХ І САМОРУХОМИХ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ СПЕЦІАЛЬНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Сучасний стан технічного прогресу характеризується інтенсифікацією робіт по підводним дослідженням, розвідці і освоєнню шельфу, а також розширенням досліджень світового океану. Найважливішими стратегічними цілями, пов'язаними з можливостями подальшого розвитку та існування людства, є майбутнє освоєння, на додаток до шельфу, значних морських глибин, сонячної системи і далекого космосу. Інтенсифікується також споживання наземних і підземних природних ресурсів, а саме рідинно-газових, паливно-енергетичних і водних. У зв'язку з цим в розвинених країнах світу приділяють серйозну увагу розробці поновлюваних джерел енергії, в тому числі енергії морських хвиль, припливів і відливів. Рішення названих складних сучасних завдань та забезпечення передумов досягнення перспективних значних цілей вимагає безперервного удосконалення і розвитку відповідних технічних засобів, що включають системи електрообладнання і автоматики зі спеціальними електромеханічними,

електронно - мікропроцесорними і приладовими комплексами. Зазначені комплекси містять габаритні і металоємні компоненти – вбудовані і занурені трансформатори. Важливими показниками таких трансформаторів є компактність, конструктивна відповідність блокам електрообладнання і зручність вбудовування. В даний час в Україні експлуатуються, а спеціалізованими заводами виробляються трансформатори з «традиційними» технічними рішеннями електромагнітних систем [1, 2]. При цьому, згідно з [3], втрати електроенергії в розподільних мережах України складають до 20% потужності, відпущеної генеруючими станціями. Значну частку цієї частини складають втрати в трансформаторах I – II габаритів класів напруги 6 – 35 кВ. Вказана обставина, вимоги мінімальних масо-габаритних показників, компактності і надійності, що пред'являються до спеціального електроустаткування [4, 5], показують важливість і актуальність розробки, аналізу спеціальних і удосконалення силових розподільчих трансформаторів різної потужності.

Метою роботи є визначення варіантів конструкцій трансформаторів, що найбільш пристосовані для комплектації опускних і саморухомих підводних апаратів.

Апарати і комплекси підводного пошукового та підводно-технічного призначень [4-10], а також суднові навісні заглибні капсули, за типами зовнішнього корпусу і оболонок розміщення елементів технічних систем поділяються на обтічні (рис. 1, а і б) і рамні (рис.1, в), а також на ті, що містять міцні сферичні (рис.1, а) і циліндричні трубчасті (рис.1, б і в) оболонки обмеженого діаметру.

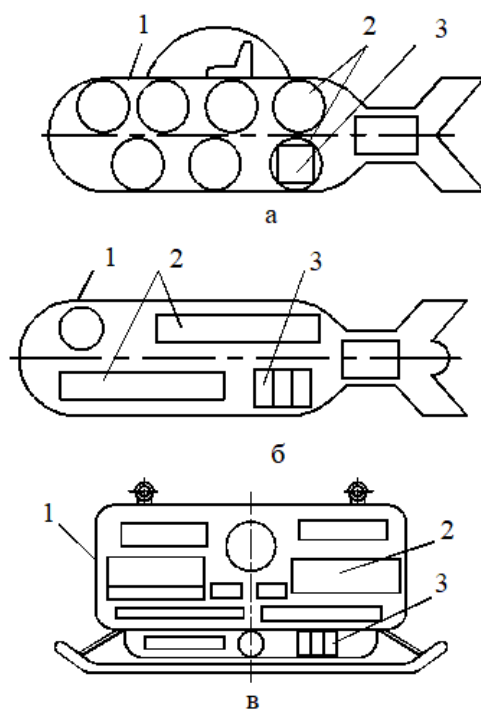


Рисунок 1 – Конструктивні схеми саморухомих населеного (а) і ненаселеного (б), а також опускного (в) підводних апаратів:
1 – корпус; 2 – оболонка системних блоків и елементів; 3 – трансформатор.

Прикладом підводного апарату, що розроблений в Миколаївському кораблебудівному інституті (Національному університеті кораблебудування) імені адмірала Макарова з електрообладнанням, що розміщене в циліндричній трубчастій оболонці, є саморухомий апарат «Атлеш» (рис. 2) [6].

Прикладом підводно-технічного об'єкту [7] з зовнішніми сферичними оболонками комплектуючого обладнання є саморухомий апарат «МТК - 200» (рис. 3).



Рисунок 2 – Загальний вигляд населеного підводного апарату типу «Атлеш»



Рисунок 3 – Саморухомий (в погрузному і доному положеннях) опускний підводний апарат "МТК - 200"

З аналізу літератури визначено, що найбільш пристосованими до вищевказаних циліндричних і трубчастих оболонок обмеженого діаметру, в яких розташоване електрообладнання підводних апаратів, є варіанти конструкцій трансформаторів з класичними тороїдними (рис. 4) та аксіальними просторовими (рис. 5) структурами магнітопроводів [1, 2].

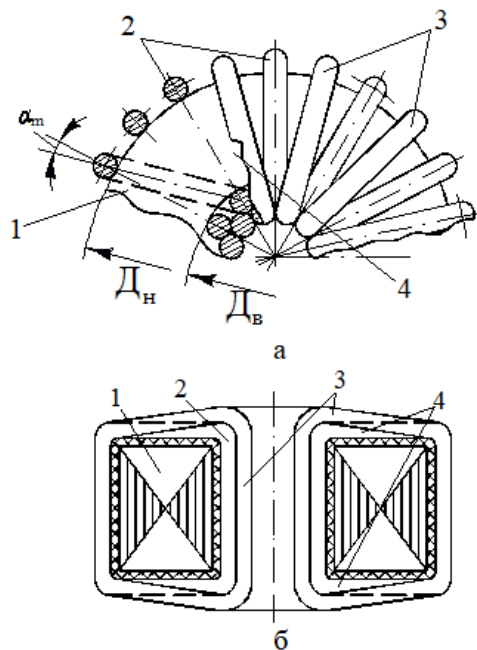


Рисунок 4 – Конструктивно-технологічні особливості на фрагменті виду зверху (а) і поперечний розріз (б) тороїдної електромагнітної системи: 1 - магнітопровід; 2 - витки першого(внутрішнього) шару; 3 - витки другого шару; 4 - порожній простір.

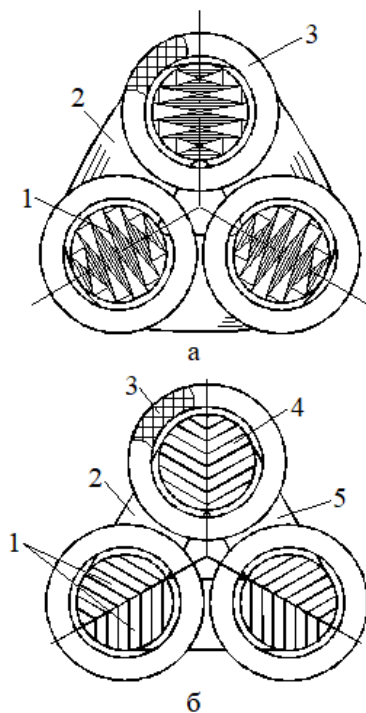


Рисунок 5 – Конструктивні схеми (в поперечному перерізі) трифазних просторових електромагнітних систем з комбінованим (а) і витим (б) магнітопроводами: 1 - стрижень; 2 - ярмо; 3 - котушка обмотки; 4 - стрижневий ділянку фазного елемента магнітопроводу; 5 - ярмна ділянка фазного елемента магнітопроводу.

Розглянуті вище варіанти електромагнітних систем трансформаторів також широко застосовують і на судах. Хоча вони і відрізняються кращими показниками компактності відносно традиційних планарних структур магнітопроводів, але мають деякі суттєві недоліки.

Отже актуальною задачею являється пошук та порівняння з відомими різновидами (рис. 4, рис. 5) нових нетрадиційних конструкторсько-технологічних рішень трансформаторів, які б були найкраще пристосовані до конк-

ретного варіанту призначення (суднового, підводно-пошукового або іншого), або до конкретного підводно-технічного об'єкту.

Висновки. 1. Структура і геометричні співвідношення електромагнітних систем компактних трансформаторів, зокрема електроенергетичних систем підводних апаратів і комплексів, повинні відповідати сферам і циліндрах мінімальних діаметрів і, спільно з іншим обладнанням, максимально заповнювати їх внутрішній об'єм.

2. Технічні рішення традиційних (і тих, що перебувають у виробництві) електромагнітних систем однофазних і трифазних трансформаторів не задовольняють в достатній мірі вимогам компактності і надійності.

3. Удосконалення і підвищення показників компактності і надійності трансформаторів при використанні традиційних способів і варіантів «безвідходної» технології виробництва магнітопроводів може бути досягнуто на основі структурної оптимізації електромагнітних систем з нетрадиційною конфігурацією стрижнів, ярем і котушок обмоток.

Список використаних джерел

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектрики. – М.: Сов. Радио, 1971.-720с.
2. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е изд. Перераб. и доп.-М. Энергоатомиздат, 1986-528с.
3. Шидловський А.К., Федоренко Г.М. Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України 1900-2000р.// Техн. Електродинаміка 2002.– №5 – с.3-12.
4. Блинцов В.С. Проблемы и пути развития электрооборудования и автоматики подводных аппаратов// Проблемы автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2007. – с.257-269.
5. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин //Електротехніка і електромеханіка. – 2008.-№1-с.44-48.
6. Блинцов В.С. Привязные подводные системы. – Київ: Наукова думка, 1998-232с.
7. Блінцов С.В. Автоматичне керування автономними підводними апаратами в умовах невизначеності. – Миколаїв: ТОВ «фірма Іліон», 2008.-204с.
8. Ставинский А.А., Забора И.Г. Усовершенствование оборудования водолазных комплексов на основе специальных исполнений электромеханических устройств// Проблемы автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської наук.-техн. конф. з міжнародною участю – Миколаїв: НУК, 2006. – с.194-202.
9. Милн П. Подводные инженерные исследования.– Л.: Судостроение, 1984.-340с.
10. Коробков В.А. Преобразование энергии океана – Л.: Судостроение, 1986.-280с.

СЕКЦІЯ 4. ІМПУЛЬСНІ ПРОЦЕСИ І ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.3.048

Малюшевська А.П., к.т.н., доцент

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

ПІДСИЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ МІКРОВІСТРІЯМ НА ПОВЕРХНІ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Розвиток енергетики, автоматизація виробництва, розширення областей застосування електричної енергії ставить перед розробниками електричної ізоляції завдання підвищення її надійності ще на стадії проектування. Впровадження нових електротехнічних матеріалів і посилення вимог до надійності електрообладнання підвищують важливість достовірного прогнозування терміну служби ізоляції та ймовірності її безвідмовної роботи. Конденсаторобудування є найважливішою областю електротехніки, яка задовольняє зростаючі потреби енергетичного комплексу. Розвиток конденсаторобудування пред'являє все більш високі вимоги до надійності і довговічності полімерній ізоляції, оскільки часто вона експлуатується в досить жорстких умовах, наприклад, в імпульсних конденсаторах електронакопичувальних установок, де при обмеженому ресурсі робоча напруженість електричного поля в діелектрику сягає 100 - 200 МВ/м.

Напруженість електричного поля в ізоляції є основним чинником, що визначає питомі характеристики, матеріаломісткість виготовлення і надійність (зокрема ресурс) конденсатора [1]. Для силових конденсаторів асортимент застосовуваних при конструюванні ізоляції електротехнічних матеріалів досить вузький. Це спеціальний конденсаторний папір і тонкі (10 - 20 мкм) синтетичні полімерні плівки, а також рідкі електроізоляційні матеріали, що заповнюють пори і просвіти між шарами ізоляції. Електроди - обкладки високовольтних конденсаторів зазвичай являють собою алюмінієву фольгу або шар алюмінію, нанесений на конденсаторну плівку (папір) [2]. За інших рівних умов конструкція з фольгою має кращі теплові характеристики в порівнянні з іншими, що важливо для високовольтних імпульсних конденсаторів, робота яких передбачає проходження великих розрядних струмів. Металізовані обкладки конденсаторів дозволяють використовувати ефект самовідновлення ємності, що значно збільшує термін служби виробів [3]. При конструюванні конденсаторів приймається, що матеріал обкладки однорідний і має однакову товщину, при цьому середню напруженість електричного поля в діелектрику визначають як відношення значення прикладеної напруги до відстані між обкладками. Однак на поверхні реальних електродів неминуха наявність виступів, вістрів, що вносять спотворення в картину розподілу електричного поля в діелектрику. Навіть при напилюванні шару алюмінію на оптично гладке скло, зображення, що отримані за допомогою атомно-силового мікроскопу, свідчать про наявність величезної кількості мікрівістрів різної форми і розмірів, висота яких сягає в окремих випадках 0,1 мкм, а відношення висоти до ширини фундаменту коливається від 1 до 10. Таким чином, спотворення картини розподілу електричного поля в діелектрику конденсатора мікрівістріями є на даному етапі розвитку виробництва електротехнічних матеріалів непереборною і підлягає ретельному вивченню. Якщо вплив на електричне поле товщини обкладок, їх зсуву, спотворення поля струмовідводами і неоднорідностями в структурі складових діелектрика, напруженість електричного поля поблизу зрізу обкладки вже вивчені досить докладно, то оцінка величини напруженості поля біля вершини мікрівістря, а також оцінка розмірів області, де спотворення поля досягають максимальних значень, до сих пір не зроблена.

Метою досліджень є вивчення фізичних процесів, що розвиваються в полімерах в сильних електричних полях і знаходження меж впливу мікрівістрів на розподіл електричного поля в діелектрику, що розділяє плоскопаралельні електроди.

Існування в полімерах областей, де напруженість електричного поля значно перевищує середнє значення, підтверджується експериментально [4]. Дослідники припускають, що можливою причиною появи областей з підвищеною напруженістю електричного поля є наявність мікрівиступів на поверхні електродів. Коефіцієнт підсилення електричного поля q (коефіцієнт електричного перенапруження, що виражається відношенням напруженості електричного поля в даній області міжелектродного простору до середньої напруженості електричного поля в зразку) сильно залежить від форми виступу [5, 6]. Необхідно відзначити також, що при зменшенні відстані між електродами коефіцієнт посилення поля зростає. Цю обставину необхідно враховувати при розгляді властивостей тонких полімерних плівок. Проте, як показано в роботі [7], при відношенні відстані між плоскими електродами до висоти виступу, що дорівнює двом, коефіцієнт посилення поля в порівнянні з випадком, коли це відношення більше на порядок, зростає всього на 10%.

Аналізувався розподіл поля в електродній системі у вигляді плоскопаралельних пластин, на одній з яких

знаходиться вісесиметричний виступ (голка), форма якої визначалася гаусовою функцією: $z = Be^{-\left(\frac{x^2+y^2}{\beta B^2}\right)}$, де B і β - параметри розподілу.

Така функція найбільш повно відображає геометрію реальних виступів на електродах і дозволяє варіювати форму мікрівістря в широкому діапазоні. Електричний потенціал площини, на якій розташовувалося мікрівістря,

варіювався при розрахунках, а потенціал протилежного електрода завжди приймався нульовим. При розрахунках вибиралися такі параметри:

- відстань між електродами - пластинами - 1000 нм;
- висота мікрівістря (B) - 250 нм;
- параметр β - варіювався від 0,0001 до 0,5, по мірі збільшення цього параметра вістря стає більш пологим.

Для розрахунку розподілу електричного поля використовувався чисельний метод математичного моделювання, відомий як метод кінцевих елементів, згідно з яким область, де шукається розподіл електричного потенціалу, розбивалася на трикутні підобласті. Усередині кожного елемента розподіл потенціалу передбачався лінійним. Знаючи величини потенціалу в вершинах трикутника можна розрахувати його і в будь-якій точці всередині трикутника. Таким чином, задача про розподіл потенціалу зводиться до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, число яких відповідає числу трикутних елементів. Розв'язуючи цю систему, можна визначити значення потенціалу в вершинах всіх трикутників, на які була розбита область пошуку рішень, тоді справжнє рішення замінюється кусково-планарною функцією, а гладка поверхня фактичного розподілу потенціалу замінюється багатогранною поверхнею апроксимації. З огляду на вісесиметричність завдання, можна звести його до двовимірного і обмежитися першим квадрантом площини вісного перерізу вістря, наприклад, ZX.

Тріангуляція області пошуку рішень здійснювалася наступним способом:

- 25 ліній, паралельних вісі симетрії вістря, проводилися таким чином, щоб перша лінія збігалася з віссю симетрії вістря (віссю Z), а наступні лінії розташовувалися зі зростаючим по мірі віддалення від вісі симетрії інтервалом;
- між паралельними площинами проводилися 90 кривих гаусова типу, що визначаються співвідношенням

$z = e^{-\left(\frac{x^2}{\beta B^2}\right)}$, причому параметр β змінювався таким чином, щоб забезпечити плавну зміну форми кривої від «голки» до «площини». Точки перетину гаусових кривих з вертикальними прямими визначали місце розташування вершин трикутників при тріангуляції.

При визначенні напруженості електричного поля в точці з координатами (x, z) розраховувалися потенціали в трьох точках $U(x, z)$, $U(x + \Delta x, z)$, $U(x, z + \Delta z)$, а потім розраховувалися компоненти напруженості E_x і E_z за вира-

зами $E_x = \frac{(U(x, z) - U(x + \Delta x, z))}{\Delta x}$ та $E_z = \frac{(U(x, z) - U(x, z + \Delta z))}{\Delta z}$, після чого визначався модуль векто-

ра напруженості електричного поля: $E(x, z) = \sqrt{E_x^2 + E_z^2}$.

Слід зазначити, що в кожному вузлі функція, яка визначає напруженість поля, зазнає розриву, оскільки право- і лівосторонні похідні відмінні одна від одної. Ця відмінність тим менше, чим більше густота сітки.

На рисунку 1 представлено розподіл електричного поля по вісі симетрії мікрівістря по мірі віддалення від вершини (початок відліку по осі абсцис відповідає вершині вістря). Розрахунки проводилися для трьох мікрівістрів $\beta = 5 \cdot 10^{-4}$ (крива 1), $\beta = 5 \cdot 10^{-3}$ (крива 2) і $\beta = 0,15$ (крива 3) при напрузі $U = 500$ В. Видно, що збільшення β приводить до формування більш однорідних полів і зниження коефіцієнта підсилення поля. Важливо, що незалежно від вибору β область, в якій коефіцієнт посилення значно більше одиниці, тобто розміри області, де спостерігається локальне посилення поля, не перевищує половини висоти вістря.

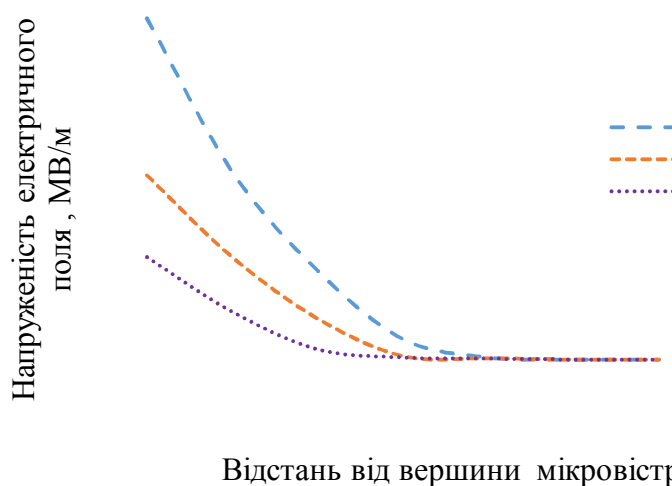


Рисунок 1 - Розподіл електричного поля по осі симетрії мікрівістря при віддаленні від вершини для $U = 500$ В

Такий результат узгоджується з висновками роботи [8], в якій зазначається, що для одиночних виступів область спотворення поля порівняння з висотою виступу, тобто отримані результати можна вважати достовірними. Відзначимо, що при $\beta = 5 \cdot 10^{-4}$, для якого коефіцієнт підсилення поля біля вершини q становить приблизно 11, ширина вістря на рівні його половинної висоти (рівній 125 нм) становить всього 10 нм, а радіус, яким можна апроксимувати саме вістря не перевищує 1 нм. Слід відзначити, що оцінка коефіцієнта підсилення поля біля вершини вістря за методикою, запропонованою в [9], дає значення 100. Однак в роботі [9] розглядається виступ еліпсоїдальної форми і область існування достовірних рішень жорстко обмежена співвідношенням висоти і радіусу кривизни виступу. Методика, що запропонована в даній роботі, пропонує більш достовірний опис форми вістря і результати моделювання більш адекватні.

На рисунку 2 наведена залежність коефіцієнта електричних перенапруг від параметра β , що дозволяє оцінити величину q біля вершини будь-яких, навіть ниткоподібних виступів. Величини q при $\beta < 1 \cdot 10^{-4}$ отримані апроксимацією результатів розрахунків q для великих значень параметра. Наприклад, при $\beta = 5 \cdot 10^{-5}$ ширина вістря на рівні його половинної висоти складає всього 1 нм, тобто порівняння з розмірами атомів, але і в цьому випадку коефіцієнт посилення поля біля вершини не перевищує 20.

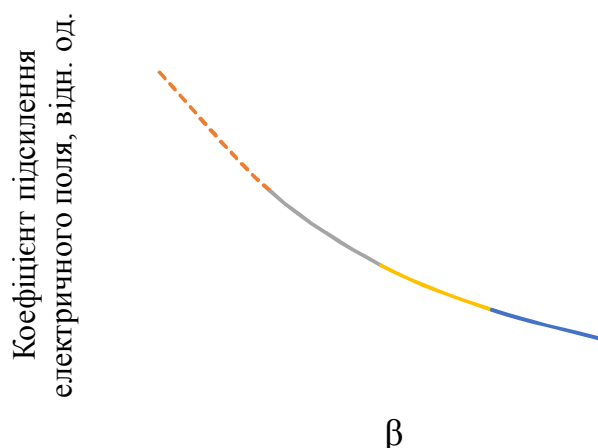


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта посилення поля біля вершини вістря гаусової форми від параметра β

Висновки. Проведені теоретичні дослідження показали, що напруженість електричного поля біля вершин мікрівістря гаусової форми на поверхні металевих електродів перевищує середню напруженість поля між плоскостями паралельними електродами не більше ніж в 10-20 разів. Для розгляду реальної картини розподілу електричного поля в полімерному діелектрику необхідно враховувати не тільки його спотворення виступами на поверхні електродів, а також результат інжекції носіїв зарядів на локальні стани (накопичення об'ємних зарядів).

Список використаних джерел

1. Малюшевська, А.П., Топоров, С.О., Гулько, В.І. Довготривала електрична міцність полімерних плівок під дією електричного поля. *Електротехніка та електроенергетика*. №1. - 2017. - С. 12 - 17.
2. Кучинский, Г.С., Назаров, Н.И. Силовые электрические конденсаторы. – М.: Энергоатомиздат, 1992 - 320 с.
3. Торошин, П.А. (1989). Металлобумажные конденсаторы. - М. - Л.: Энергия, 1989. - 214 с.
4. Невровский, В. А., Ярославский, В.Н. О зависимости коэффициента β катодных микровыступов от ширины междуэлектродного промежутка. *Журнал технической физики*. – 1982. - Т. 52. № 2. - Р.278 - 282.
5. Hare, R. W., Hill, R.M. (1991). Space charge in insulators with needle-plane geometry. *Journal of Applied Physics*. - V. 24, № 3. - P. 398 - 406.
6. Баскин, Л. М., Владимиров, Г.Г., Шредник, В.Н. Статистические методы локального микроанализа электронной структуры поверхности полевых эмиттеров. *Поверхность*. - 1999. - № 7. - С. 67 -72.
7. Mahapatro, A. K., Agrawal, R., Ghosh, S. Electric-field-induced conductance transition in 8-hydroxyquinoline aluminum. *Journal of Applied Physics*. - 2004. - V. 96, № 6. - P. 3583-3585.
8. Jaeger, D. L., Hren, J.J., Zhirnov, V.V. Local electrostatic effects of surface structure on field emission. *Journal of Applied Physics*. – 2003. - V. 93, N 1. - P. 691- 697.
9. Сливков, И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. - 256 с.
10. Dissado, L.F., Mazzanti, G., Montanari, G.C. The Role of Trapped Space Charge in the Electrical Aging of Insulating Materials. *IEEE Transaction of Electr. Insul.* – 1997. - V. 4, № - P. 496 - 506.
11. Mazzanti G., Montanari, G.C., Dissado, L. A. Electrical Aging and Life Models: The Role of Space Charge. *IEEE Trans, on Electr. Insul.* – 2005. - V. 12, No 5.-P. 876 – 890.

УДК 681.52:537.528:544.5

Козирев С. С., к.т.н.; Літвінов К. В., студент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

МЕТОД НЕПРЯМОЇ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛІ ТИСКУ ПРИ ВИСОКОВОЛЬТНОМУ РОЗРЯДІ У КОНДЕНСОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Високопродуктивні технологічні процеси з використанням вибухового перетворення енергії широко використовуються в різних галузях промисловості. В технологіях розрядно-імпульсної обробки матеріалів і виробів використовують високовольтний електричний розряд в конденсованих середовищах як джерело концентрованого, дозованого впливу в заданих локальних об'ємах з високими питомими енергетичними показниками. Основними факторами, що діють на об'єкт обробки, є хвилі тиску, що розповсюджуються в робочому середовищі й використовуються для руйнування, формоутворення, подрібнення, диспергування та ін. [1, 2, 3, 4].

Параметри профілю хвилі тиску, що випромінюється на активній стадії розширення каналу розряду можуть служити мірою ефективності розрядноімпульсних технологічних процесів, що використовують електровибухове перетворення енергії [5]. Тому контроль тиску в каналі розряду є важливим для оцінки й контролю поточної реалізації технологічного процесу і є найбільш інформативною величиною для синтезу систем керування.

Поточний неперервний контроль тиску в каналі розряду неможливий, оскільки є операційно не визначеним, так як існуючі датчики тиску не забезпечують неперервний контроль в продовж всього технологічного циклу. Тому сигнал з датчиків тиску не може бути використаним в якості інформаційної координати при поточному керуванні розрядноімпульсним технологічним процесом. У зв'язку з цим необхідно визначити метод непрямой опосередкованої оцінки параметрів випроміненої хвилі тиску каналом розряду.

Метою даної роботи є визначення інформаційних координат для непрямой оцінки тиску в каналі розряду. Проведено дослідження взаємозв'язку електродинамічних і гідродинамічних параметрів високовольтного розряду в конденсованому середовищі. Оскільки електродинамічні і гідродинамічні процеси носять стохастичний характер, то необхідно оперувати ймовірнісними показниками випадкових величин, що характеризують ці процеси. Електродинамічні і гідродинамічні процеси при електровибуху характеризуються наступними величинами: напруга пробою $U(t)$, розрядний струм $I(t)$, електрична потужність $N(t)$, тиск в хвилі стиснення $P(t)$. Існує ряд досліджень, які показують, що ці характеристики підпорядковуються нормальному закону розподілу [6]. З метою встановлення зв'язку між електродинамічними $U(t)$, $I(t)$, $N(t)$ і гідродинамічними $P(t)$ характеристиками електровибуху проведено їх кореляційний аналіз. Так як досліджувані величини розподілені нормально, то для проведення кореляційного аналізу застосовувався лінійний коефіцієнт кореляції Пірсона r , який використовується для оцінки лінійного зв'язку, і коефіцієнт детермінації $R=r^2$, який характеризує щільність зв'язку [7]. Кореляційний аналіз проводився для різних комбінацій електродинамічних $U(t)$, $I(t)$, $N(t)$ і гідродинамічних $P(t)$ величин. Результати розрахунків r і R представлені в табл. № 1.

Таблиця 1 - Результати кореляційного аналізу

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

Отримані коефіцієнти детермінації R між електродинамічними і гідродинамічними характеристиками підтверджують наявність досить щільного зв'язку між ними, незважаючи на стохастичність цих процесів. Таким чином в якості інформаційних координат, що опосередковано визначають тиск в каналі розряду, можуть бути використані операційно визначені електродинамічні характеристики $U(t)$, $I(t)$, $N(t)=U(t) \cdot I(t)$. Найбільш щільний інформаційний зв'язок спостерігається між $P(t)$ і $N(t)$, що і використовується для достовірної оцінки параметрів хвилі тиску.

Використання $N(t)=U(t) \cdot I(t)$ в якості інформаційної координати дозволяє з достатнім ступенем точності отримувати поточну оцінку тиску в каналі розряду $P(t)$ при керованому електровибуху.

Залежність між $P(t)$ і $N(t)$ може також оперативним обчислюватися за системою рівнянь: (1) – рівняння балансу енергії в каналі розряду, (2) – залежність тиску на поверхні каналу розряду від площі поперечного перерізу [8]:

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

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

де $P(t)$ – тиск в каналі розряду, $a(t)$ – радіус каналу розряду, l – довжина розрядного проміжку, γ – ефективний показник адіабати, ρ – густина середовища, $N(t)=U(t) \cdot I(t)$.

Розв'язання даної системи рівнянь виконувалось в пакеті MathCAD за допомогою функції *odesolve* [9] з використанням розв'язувача Radau, який використовує алгоритм розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь RADAU5. Метод RADAU5 оснований на тристадійному повністю неявному методі Рунге-Кутта п'ятого порядку точності і використовується у випадках, коли в розв'язанні диференціальних рівнянь є плавно змінювана компонента, а також швидко затухаючі збурення.

Приклад результату застосування запропонованої методики непрямого визначення параметрів хвилі тиску $P(t)$ при електровибуху наведено на рис. 1.

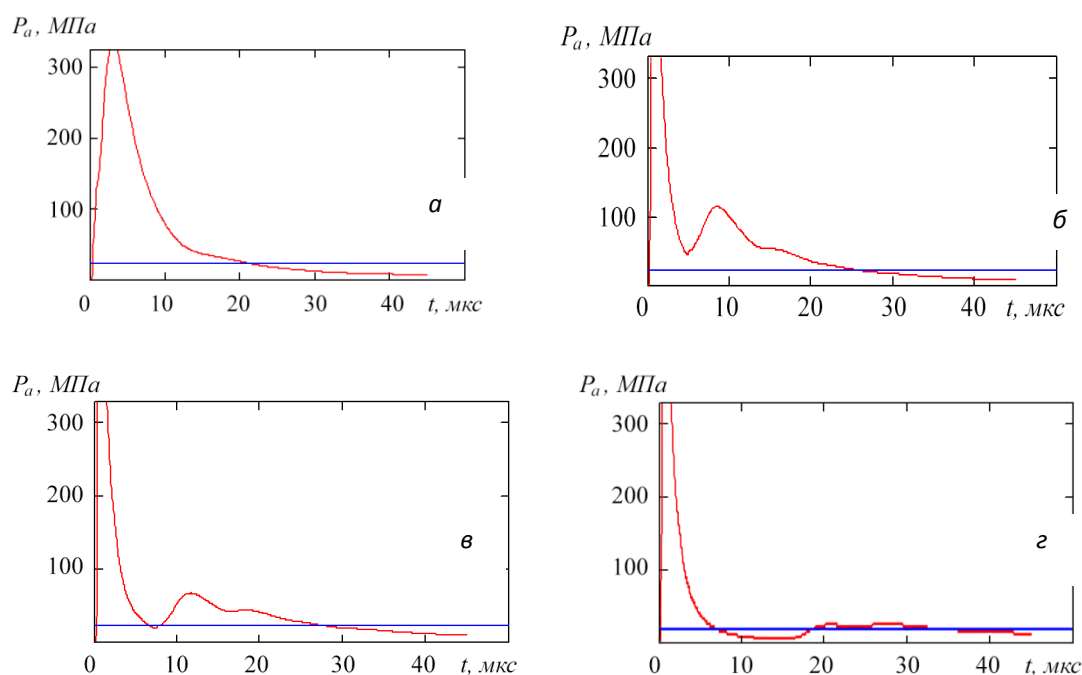
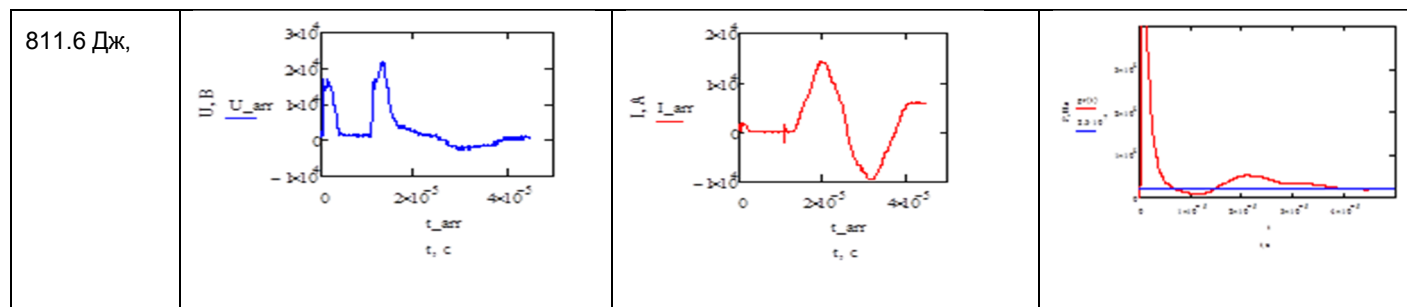


Рисунок 1 – Часові залежності тиску в каналі розряду $P(t)$

Результати експериментальних досліджень гідродинамічних характеристик електровибуху, а саме параметрів хвилі тиску $P(t)$, опосередковано визначених за електродинамічними характеристиками $U(t)$ та $I(t)$, можуть зберігатися у формі, наведеній в таблиці 2.

Таблиця 2

Енергія W_{Σ} ,	$U(t)$	$I(t)$	$P(t)$
------------------------	--------	--------	--------



Весь масив експериментальних даних $U(t)$ та $I(t)$ зберігається у файлах архіву MathCAD, а для розрахунку $N(t)=U(t) \cdot I(t)$ та параметрів хвилі тиску $P(t)$ використовується розрахунковий файл MathCAD. Банк результатів експериментальних досліджень опосередкованої оцінки параметрів хвилі тиску $P(t)$ за електродинамічними характеристиками $U(t)$ та $I(t)$ може використовуватись як база даних при синтезі системи керування багатоімпульсним вводом енергії в канал розряду.

Висновки. Запропонований метод забезпечує отримання достовірної інформації про параметри хвилі тиску $P(t)$ при високовольтному електровибуху шляхом їх непрямої оцінки за електродинамічними характеристиками $U(t)$ та $I(t)$, які є операційно визначеними і можуть бути використані в якості інформаційних координат в системі керування. А отриманий масив експериментальних даних може використовуватись при синтезі системи керування в якості бази знань алгоритму керування.

Список використаних джерел

1. Гулый Г. А. Научные основы разрядноимпульсных технологий. К.: Наук. думка, 1990. 208 с.
2. 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 Electrochemistry*. 2008. Vol. 44, Issue 3. P. 240–242.
3. Рытов С. А. Эффективность применения электроразрядных технологий для устройства геотехнических конструкций. *Жилищное строительство*. 2010. № 5. С. 47–50.
4. 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 Electrochemistry*. 2007. Vol. 43, Issue 2. P. 116–118.
5. Вовченко А. И., Посохов А. А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. К.: Наук. думка, 1992. 168 с.
6. 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, 513–517.
7. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 477 с.
8. Кривицкий, Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е.В. Кривицкий. – Киев: Наукова думка, 1986. – 206 с.
9. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999, 685 с.

УДК 621.319.4

Конотопенко В., Травицкий В.

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

ОГЛЯД ДІЕЛЕКТРИКІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СИЛОВОГО КОНДЕНСАТОРА З ПІДВИЩЕНОЮ ЧАСТОТОЮ ПРОХОДЖЕННЯ ІМПУЛЬСІВ

Метою роботи є аналіз сучасного стану області розробки та виробництва електротехнічних матеріалів для силових високочастотних конденсаторів та іншого високовольтного обладнання.

Якщо прийняти за технічну вимогу те, що силовий конденсатор призначений для експлуатації в режимі з високою частотою проходження зарядів-розрядів (до 100 Гц), то основним елементом його діелектричної системи має бути не традиційний конденсаторний папір, а електроізоляційна полімерна плівка, яка відрізняється своєю значно більш високою однорідністю, електричною міцністю і низькими показниками діелектричних втрат [4].

Провідні позиції при створенні конденсаторів із плівковим робочим діелектриком, що працюють в високочастотному режимі, займає поліпропіленова плівка, яка відноситься до неполярних діелектриків [5]. Поліпропіленову

плівку виготовляють з ізотактичного поліпропілену й завдяки поєднанню високої електричної міцності, низьких діелектричних втрат, малого вмісту слабких місць на одиницю площі, дешевизні та можливості широкої модифікації технологічних властивостей, виробництво такої плівки є широко розвинутим у світі [6]. Властивості плівки у великій мірі залежать від способу виготовлення - екструзією або видуванням. Способом видування виготовляється м'яка плівка з доволі великим розкидом за товщиною, а способом екструзії – більш тонка, більш тверда та з меншим розкидом. У США застосовують спосіб видування, у Франції, Італії, Україні й Німеччині – спосіб екструзії, у Японії – обидва способи. Поверхня плівки може мати як природну, так і штучно утворену однобічну або двосторонню шорсткість. Наявність шорсткості на поверхні плівки забезпечує якісне просочення обладнання електроізоляційними рідинами, а також облегшує процес намотування секцій, знижуючи злипання шарів плівки. Рекомендований температурний діапазон експлуатації поліпропіленової плівки - від мінус 60 °C до плюс 100 °C - є доволі широким. Необхідно відзначити, що електрофізичні характеристики поліпропіленової плівки різних виробників відрізняються між собою незначно.

Проведені раніше в ІПТ НАН України експериментальні дослідження з оцінки довговічності застосовуваних у високовольтному конденсаторобудуванні полімерних плівок, а саме: поліпропіленової (італійського та українського виробництва), поліетиленової, політетрафторетиленової, поліімідної, полікарбонатної та поліетилентерефталатної, дозволили розглядати поліпропіленову плівку українського виробництва, як найбільш технологічно придатну та найбільш електрично міцну [7]. Таким чином, вивчення сучасного ринку електротехнічних матеріалів для створення силових конденсаторів, які працюватимуть при високій частоті, показало, що компромісним варіантом для виготовлення силових конденсаторів є поліпропіленова плівка Tervakoski Film марки RER, (виробник ЗАТ СП „ТЕРИХЕМ-ЛУЦК”, Україна). Плівка характеризується електричною міцністю не менш 210 кВ/мм, відносною діелектричною проникністю ε (при 20 °C і частоті 10 Гц) – 2,2, тангенсом кута діелектричних втрат $\tan\delta$ (при 20 °C і діапазоні частот від 50 Гц до 10^6 Гц) – $2 \cdot 10^{-4}$, максимальною температурою експлуатації плівки – 100 °C (тривалий вплив), 120 °C (короточасний вплив) [8].

Що стосується обов'язкового елемента діелектричної системи силових конденсаторів - рідкого просочуючого діелектрика, то для високочастотного конденсатора необхідно обирати рідину, яка задовольняє умовам електричної міцності, стійкості до часткових розрядів та сумісності з твердими елементами діелектрика.

Просочуюча електроізоляційна рідина призначена для заповнення вільного простору між шарами робочого діелектрика конденсатора, підвищує його електричну міцність і величину відносної діелектричної проникності діелектричної системи в цілому, що позитивно позначається на питомих та експлуатаційних характеристиках. Вимоги, які пред'являють до рідких просочуючих діелектриків, дуже суперечливі. Такі електроізоляційні рідини повинні характеризуватися високою електричною міцністю, мати одночасно високе значення відносної діелектричної проникності та низьке значення тангенса кута діелектричних втрат, малу в'язкість у діапазоні робочих температур конденсатора. Рідкий діелектрик повинен демонструвати стабільні характеристики в умовах впливу високої напруженості електричного поля, широкий діапазон робочих температур, бути негорючим та біологічно безпечним. Однак рідких діелектриків, що задовольняють одночасно всім цим вимогам, у природі не існує. Тому при виборі рідкого просочуючого діелектрика для конкретного силового конденсатора визначальними факторами є тип діелектричної системи конденсатора, умови та режим його експлуатації.

Раніше в ІПТ проводилися експериментальні дослідження щодо вибору типу просочуючої електроізоляційної рідини для різних комбінацій полімерного плівкового робочого діелектрика та оцінювалася його довговічність залежно від режимів експлуатації високовольтного імпульсного конденсатора [7, 9]. У результаті цих досліджень було отримано, що для якісного просочення плівкової діелектричної системи та забезпечення високих значень короточасної та тривалої електричної міцності повинні бути задіяні малов'язкі неполярні діелектричні рідини.

В Україні при просоченні плівкових діелектричних систем силових конденсаторів знайшли широке застосування трансформаторні оливи марок Т-1500 ДСТУ 982-80 і ГК ТУ 38-401-358-84 виробництва фірми „APIAN”, Україна, які відносяться до мінеральних нафтових масел [10 - 15]. Електрофізичні та фізико-хімічні характеристики цих масел близькі, вони відрізняються друг від друга головним чином походженням (родовищами нафти) та способами очищення. У європейських країнах для просочення діелектричних систем високовольтних електротехнічних пристроїв рекомендуються трансформаторні оливи марок Nytro 10 XN і Nytro 11 GX виробництва фірми „NYNAS”, Швеція, які є аналогами олив марок Т-1500 та ГК [16, 17].

Конденсатори із просоченням високоочищеними (переочищеними) маслами, як показав досвід виробництва в ІПТ, виходили з ладу частіше, ніж з маслами, що містять великий відсоток природних антиокислювачів і компонентів, стійких до впливу електричного поля. Масла з підвищеним вмістом ароматичних вуглеводнів мають підвищені окисну й електричну стійкості, меншу схильність до виділення газів при впливі на них електричних розрядів і мають більшу здатність до газопоглинання. Ароматичні вуглеводні є необхідною складовою частиною електроізоляційних нафтових масел. Їх кількісний і структурний склад багато в чому визначає фізико-хімічні та електричні характеристики масел. Повне видалення ароматичних вуглеводнів з масла в процесі очищення призводить до зниження стійкості масла проти окислювання (особливо при підвищеній температурі). У той же час, наявність

великої кількості ароматичних вуглеводнів, особливо поліциклічних, підвищує значення тангенсу кута діелектричних втрат масла. Тому для кожного типу масла підбирається оптимальне співвідношення нафтових та ароматичних вуглеводнів.

Сумісність із твердими електротехнічними матеріалами відіграє немаловажну роль при виборі масла, як просочуючого діелектрика [18]. Сталь, олово, олов'яно-свинцевий сплав, нікель, хром, кадмій мало змінюються самі та слабо впливають на масло під час термоокислювального старіння. Мідь та мідні сплави інтенсивно кородують, є активними каталізаторами окислювання та значно підвищують тангенс кута діелектричних втрат. Інтенсивність корозії підвищується з підвищенням температури окислювання та пов'язана з хімічним складом рідини. Тому у просочених нафтовою оливою високовольтних електротехнічних пристроях, які розраховані на тривалий термін служби без його заміни, всі мідні струмоведучі частини лудять, цинкують або нікелюють.

Колір трансформаторної оливи зазвичай солом'яно-жовтий та характеризує глибину очищення – чим глибше очищення, тим світліше олива. Відносна діелектрична проникність у нафтових оливах низька та дорівнює приблизно 2,2 при 20 °C, з ростом температури до 90 °C знижується в середньому на величину від 3 % до 4 %. При частоті 50 Гц тангенс кута діелектричних втрат оливи практично визначається провідністю та залежить від ступеня його очищення. Зі збільшенням температури тангенс кута діелектричних втрат лінійно зростає. Для технічно чистої оливи пробивна напруга в стандартному розряднику становить від 50 кВ до 60 кВ при 50 Гц і 120 кВ при впливі імпульсів [19]. Одним з істотних недоліків трансформаторних оливах є те, що зниження температури їх експлуатації у межах від плюс 20 °C до мінус 5 °C, при змінній або постійній напрузі, призводить до зменшення короточасної електричної міцності, а подальше зниження температури від мінус 5 °C до мінус 45 °C викликає вже її зростання. Це пояснюється різним агрегатним станом води в оливі, утворенням кристалів льоду та зміною в'язкості.

Через горючість, неоднорідність властивостей, яка обумовлена неоднорідністю складу, недостатньо високу стійкість в електричному полі (з урахуванням сучасних вимог до високовольтного обладнання), виснаження традиційних джерел нафти, придатних для виготовлення електроізоляційних масел, намітилася тенденція заміни нафтових оливах синтетичними вуглеводнями [13].

При створенні деяких типів конденсаторів, зокрема високовольтних імпульсних для електрогідроімпульсних пристроїв для збільшення дебіту нафтових та газових свердловин з розширенням діапазоном робочих температур експлуатації до 100 °C і вище, а також силових конденсаторів для електротранспорту вугільних шахт, де пред'являються підвищені вимоги щодо пожежної безпеки застосовуваного обладнання, становлять інтерес кремнійорганічні просочуючі рідини [20, 21].

Рідкі кремнійорганічні рідини нетоксичні, екологічно безпечні, мають високу термоокислювальну стабільність і експлуатаційну надійність. З кремнійорганічних рідин – просочувальних діелектриків силових конденсаторів – найбільш широке застосування отримали поліметилсілоксанові рідини [11]. В'язкість цих рідин може коливатися в широкому інтервалі від 1 сСт до $1 \cdot 10^3$ сСт залежно від молекулярної ваги. Залежно від в'язкості збільшується густина рідин, величина її становить від 0,96 г/см³ до 0,99 г/см³. Провідне місце в області вітчизняного виробництва поліметилсілоксанових кремнійорганічних рідин займає Запорізьке державне підприємство „Кремнійполімер”, [22]. Поліметилсілоксанові рідини прозорі, безбарвні, хімічно інертні, корозійно стійкі, гідрофобні, мають гарні діелектричні та демпфуючі властивості та є поверхнево-активними речовинами. Температура застигання поліметилсілоксанових рідин нижче мінус 60°C, тому вони можуть використовуватися при робочих температурах від мінус 50°C до плюс 200°C. Зі збільшенням в'язкості рідин нижня межа робочих температур знижується від мінус 5 °C до мінус 40 °C, разом з тим, зі зростанням в'язкості рідин збільшуються їх електрична міцність та питомий об'ємний електричний опір.

Однак у виробництві силових конденсаторів, які призначені для експлуатації у нормальних кліматичних умовах та режимах з високою частотою проходження зарядів-розрядів, ці рідини не знайшли широкого застосування через свою незадовільну електричну міцність та низьку газостійкість [19].

Для просочення силових конденсаторів з робочим діелектриком на основі полімерних плівок широке застосування у світовій практиці високовольтного конденсаторобудування одержали такі синтетичні електроізоляційні рідини як JARILEC C101 виробництва фірми „Arkema”, Франція та фенілксилілетан (ФКЕ) виробництва фірми „Nippon Chemical Co”, Японія [20, 21]. Діелектрична рідина JARILEC C101 являє собою суміш 75 % монобензілтолуолу і 25 % дібензілтолуолу. Рідина хімічно стабільна, має задовільну електричну міцність, стійка до перенапруг, має малу в'язкість і низьку температуру застигання, відноситься до класу помірно небезпечних речовин, екологічно сумісна. В ІПТ раніше проводилися експериментальні дослідження діелектричних рідин на основі суміші моно- і дібензілтолуолів і неодноразово надходили скарги від робочого персоналу на різкий запах цих рідин і симптоми алергії. Фірма „Arkema” признає той факт, що діелектрична рідина JARILEC C101 має сильний запах, який може негативно впливати на персонал. Тому цим виробником було створено діелектричну рідину JARILEC C101D, що є ароматизованим варіантом рідини JARILEC C101, де інтенсивність запаху знижена і стає задовільною [20].

Більш широке застосування, у порівнянні з JARILEC C101, для просочення плівкового діелектрика силових конденсаторів знайшов фенілксилілетан (ФКЕ) – синтетична вуглеводна ароматична речовина ряду діаріалкану [21]. Наприклад, Усть-Каменогорський конденсаторний завод (Казахстан) виробляє силові конденсатори тільки із плівковим робочим діелектриком, просоченим фенілксилілетаном [22]. ФКЕ має найвищу газостійкість серед розглянутих синтетичних рідких діелектриків, стабільний та екологічно безпечний, стійкий до перенапруг, забезпечує зниження ймовірності виникнення часткових розрядів і має великий термін служби. Раніше в ІПТТ проводилися експериментальні дослідження тривалої електричної міцності різних діелектричних систем на основі полімерних плівок – полікарбонатної, поліетилентерефталатної та поліпропіленової [10]. У ролі просочуючих рідких діелектриків досліджувалися трансформаторна олива Т-1500, ФКЕ, поліметилсілоксанові рідини ПМС-10 та ПМС-20. Метою досліджень був вибір оптимальних діелектричних систем на основі комбінацій полімерних плівок і діелектричних рідин для виготовлення надійного робочого діелектрика високовольтних імпульсних конденсаторів. Експериментальні дослідження показали, що тип просочувальної рідини впливає на тривалу електричну міцність досліджуваних діелектричних систем - в однакових умовах випробувань зразки на основі поліпропіленової плівки, що були просочені ФКЕ, характеризувалися більш високим значеннями короткочасної та тривалої електричної міцності в порівнянні з аналогічними зразками, просоченими трансформаторною оливою Т-1500 та поліметилсілоксановими рідинками ПМС-10 та ПМС-20.

В [20] наведено результати експериментальних досліджень тривалої електричної міцності плівкових діелектриків, просочених нафтовими оливами, ФКЕ, JARILEC C101 та рідиною Миксофлекс 1000, виробництва фірми „Prodelec”, Франція. Було встановлено, що найбільшу електричну міцність має поліпропіленовий плівковий діелектрик, просочений ФКЕ, при цьому коефіцієнт варіації по електричній міцності діелектрика складає 2,4 %. За результатами експериментальних досліджень було зроблено висновок, що для просочення робочого діелектрика силових конденсаторів із поліпропіленовою плівкою найбільш перспективною є електроізоляційна рідина ФКЕ.

Таким чином, за результатами проведеного огляду малов'язких неполярних електроізоляційних рідин, застосовуваних для просочення діелектриків на основі полімерних плівок, можна зробити наступний висновок – для просочення плівкового діелектрика високовольтного імпульсного конденсатора з підвищеною частотою імпульсів раціональним буде застосування фенілксилілетану.

Основні характеристики розглянутих малов'язких неполярних діелектричних рідин, що отримали найбільш широке застосування для просочення плівкової ізоляції в сучасних високовольтних електротехнічних пристроях, представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики малов'язких неполярних діелектричних рідин

Найменування рідини	Страна-виробник	Густина, г/см³	В'язкість, сСт	ε	tg δ (при 90 °C)	Електрична міцність, кВ/мм	Температура спалаху, °C
		при 20 °C					
Трансформаторна олива Т-1500	Україна	0,895	8,0 (50 °C)	2,2	0,005	30	135
Трансформаторна олива ГК			9,0 (50 °C)			32	135
Трансформаторна олива Nytro 10XN	Швеція		8,0 (40 °C)			28	140
Трансформаторна олива Nytro 11GX			11,0 (40 °C)			20	135
Поліметилсілоксанова ПМС-10	Україна	0,960	10	2,6	0,003	18	170
ПМС-20		0,974	20	2,6	0,003	18	200
ПМС-100		0,990	100	2,7	0,002	19	300
Фенілксилілетан	Японія	0,990	6,5	2,5	0,0003	31	148
JARILEC C101	Франція	1,010	6,5	2,66	0,004	35	144

Таким чином, вибір рідких просочуючих діелектриків для створення силових конденсаторів є досить широким, але не достатньо вивченим є питання взаємодії електроізоляційної рідини з полімерними плівками, які є обов'язковою складовою діелектрика сучасних високовольтних електротехнічних пристроїв. В умовах експлуатації силових конденсаторів, наприклад, діелектрик піддається як впливу температурних полів за рахунок нагрівання струмоведучих частин конденсатора, так і впливу електричних полів великої напруженості (до 10⁶ В/м), крім того неможливо уникнути природної електрохімічної взаємодії рідини і твердих компонентів діелектрика. В таких складних умовах необхідно вивчати старіння діелектрика просоченого плівкового діелектрика комплексно та

створювати методики неруйнівного контролю електротехнічних пристроїв з просоченням для обґрунтованого прогнозування їх надійності та довговічності.

Висновки. Аналіз науково – технічної літератури показав, що сьогодні найбільш технологічно привабливими та сучасними матеріалами для виготовлення діелектрика силових конденсаторів (в тому числі високовольтних імпульсних) для забезпечення роботи на підвищеній частоті є поліпропіленова плівка та фенілксілетан. Вивчення взаємодії просочуючого діелектрика з іншими елементами діелектричної системи є актуальним науково-практичним питанням. Великі сподівання виробники високовольтного обладнання покладають на дослідників в області створення нових електротехнічних матеріалів, що розробляють полімерні плівки зі зміцненим поверхневим шаром, які є значно більш стійкими до взаємодії з просочуючими рідинами в умовах високої температури та сильних електричних полів.

Список використаних джерел

1. Кучинский, Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы / Г.С. Кучинский. – М.: Энергия, 1973. – 176 с.
2. Кучинский, Г.С. Силовые электрические конденсаторы / Г.С. Кучинский, Н.И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 320 с.
3. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого. – В 3 т. Т.2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
4. ТУ У 25.2-25093118-001. Плівки поліпропіленові двовісноорієнтовані. Технічні умови [Текст]. Введ. 2001-12-19. – Луцьк: Волинський державний центр стандартизації, метрології та сертифікації, 2001. – 27 с.
5. Гребенников, И.Ю. О повышении удельных характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов / И.Ю. Гребенников, В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.С. Швеце // Электронная обработка материалов. – 2004. – №5. – С.70 -74.
6. Рудаков, В.В. Высоковольтные импульсные конденсаторы разработки НИПКИ «Молния», НТУ «ХПИ» / В.В. Рудаков, Н.И. Бойко, В.Д. Беспалов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Электротехника и преобразовательная техника»: сб. науч. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – С. 47 – 58.
7. Малюшевська, А.П. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короткочасної електричної міцності / А.П. Малюшевська, С.О. Топоров // Електротехніка та Електроенергетика - 2016. - № 1 - С. 18 - 24.
8. Гунько, В.И. Исследование конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов / В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, С.О. Топоров, Т.А. Фецул // Электронная обработка материалов. – 2012. – № 2. – С. 93 – 96.
9. Гунько, В.И. Разработка высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком / В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, С.О. Топоров, И.А. Перекупка // Вісник НТУ «ХПИ». Серія «Техніка та електрофізика високих напруг»: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПИ», 2012. – С. 65 – 71.
10. Базовые и трансформаторные масла Nynas [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.nynas.com.
11. Область применения трансформаторных масел [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://english.sinopec.com/products_service/lubricants/indulube/transformer_o/October2013. – P. 12-25. DOI: 10.1109/MEI.2013.6585853
12. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого. – В 3 т. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 386 с.
13. Физическая энциклопедия. Жидкие диэлектрики. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://femto.com.ua/articles/part_1/1170.html.
14. Виды жидких диэлектриков, свойства, область применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studik.net/sinteticheskie-zhidkie-dielektriki/>.
15. Запорожское государственное предприятие «Кремнийполимер»: каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.silic.com.ua.
16. Пропитывающие диэлектрики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: kvar.su/books/2/chap6.pdf.
17. Синтетические жидкие диэлектрики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: lib.kstu.kz.8300/tb/books/materialovedenie/teory/3.2.3.html.
18. Синтетические жидкие диэлектрики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://studik.net/sinteticheskie-zhidkie-dielektriki/>.
19. JARYLEC C101, the most efficient dielectric oil for HV capacitors and capacitive HV equipments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Jarylec-dielectric-fluids/2/>.
20. Fofana, I. 50 Years in the Development of Insulating Liquids / I. Fofana // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – Vol. 29, №5. – P. 13 – 25.
21. Усть-Каменогорский конденсаторный завод: сайт предприятия. – Режим доступа: <http://www.ukkz.com>
22. Галахова, Л.И. Электрические характеристики изоляции силовых конденсаторов промышленной частоты с пропиткой экологически безопасными жидкостями: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.12 «Техника высоких напряжений» / Л.И. Галахова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: tekhnosfera.com/view/454825/a#?page=1-21.

УДК 621.314.26

Палига О.О.

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

ІМПУЛЬСНЕ ДЖЕРЕЛО ДЛЯ КОМБІНОВАНОГО РЕЖИМУ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРІВ ПІДПРИЄМСТВ ЧОРНОЇ ТА КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

У світі споживаються мільярди тонн мінеральної сировини, палива, води, атмосферного кисню, а в готовий продукт переходить близько 1% витрачених природних ресурсів. При цьому щорічно в атмосферу викидається близько. 1 млрд. т аерозолів і газів (в т.ч. CO, SO₂, NO, NO₂), приблизно стільки ж сажі; в природні водойми надходить більше 500 млрд. т промислових і побутових стоків. Відходи і викиди виснажують запаси не відновлюваних природних ресурсів і мають шкідливий, а часом і смертельний вплив на навколишнє середовище і на умови життя людини.

Найбільш серйозний вплив на НС(навколишнє середовище) надає металургія, зокрема чорна. Металургія є енерго- і ресурсомісткою галуззю. При щорічному споживанні кількох тисяч тонн мінеральних ресурсів в кінцеву продукцію переходить не більше 30%, решта ж утворює відходи виробництва. Так, металургійний завод повного циклу з продуктивністю 10 млн. т сталі в рік, до введення суворого контролю викидав щорічно в атмосферу більше 200 тис. т пилю, 50 тис. т сполук сірки, 250 тис. т оксиду вуглецю, оксидів азоту і ін. речовин. Концентрація пилю в викидах досягала 50-120 кг / т одержуваної стали. В удосконалених металургійних процесах ці викиди знижуються до 10 кг / т сталі.

Газоподібні викиди металургійних заводів становлять близько 2500 м³ / т сталі. Джерелом сірчистих сполук, що викидаються в атмосферу, є, головним чином, кокс (40-60%) і руда (5-30%). Зі шлаками з металургійних агрегатів видалається 45-55% сірки, а в сталеві вироби переходить до 6% сірки, решта сірки викидається в атмосферу. Головним джерелом викиду SO₂ є агломерація (45-55% від загальних викидів SO₂). Значна кількість SO₂(оксид сірки) або H₂S(сірководень) викидається в атмосферу під час охолодження і переробки шлаку (10-35%). Інша кількість SO₂ надходить в навколишнє середовище з труб котельних установок, сталеливарних і прокатних цехів.

Ціаністий водень HCN присутній, головним чином, в доменному газі. Концентрація його становить, мг / м³: при виробництві чавуну 200-400, при виробництві дзеркального чавуну 300-400 і при виробництві феромарганцю 1500-3500. Викиди ціаністого водню агрегатами коксового заводу можуть досягати 0,5 кг / т коксу. Оксиди азоту утворюються в доменних, мартенівських і нагрівальних печах, в печах коксохімічного виробництва і в парових котлах. У доменних печах джерелом викиду оксидів азоту є доменні повітрянагрівачі, у вихідних газах яких вміст NO_x становить $(1,7 \div 6,6) \cdot 10^{-4}\%$. Концентрація окислів азоту в вертикальних каналах мартенівських печей при опаленні без інтенсифікаторів становить в середньому 0,03%; при подачі кисню вона зростає до 0,1% і в ряді випадків досягає 0,25%. Середня кількість викидів оксидів азоту становить 2,5 кг / т сталі. Найбільш підходящим для очищення дуже великих обсягів газоподібних викидів, характерних для металургійної промисловості, завжди були і залишаються електрофільтри. Електрофільтри характеризуються малим гідравлічним опором, потребують невеликих енергетичних витрат, можуть в принципі забезпечити необхідну високу ступінь очищення димових газів від пилю. Враховуючи вже досягнутий, відносно високий рівень сучасних електрофільтрів, не вдається обійтися вдосконаленням певного вузла. Єдиний можливий шлях полягає у комплексному рішенні. [1]

Метою роботи є розробка імпульсного джерела для комбінованого режиму живлення електрофільтрів металургійних підприємств чорної та кольорової металургії, яке повинно за рахунок збільшення потужності підвищити ефективність уловлювання летючого попелу електрофільтром.

Доцільність використання комбінованого режиму живлення в електрофільтрах металургії

Виробничі процеси металургії. Всі процеси металургії, як чорної, так і кольорової, в тій чи іншій мірі пов'язані з виділенням відпрацьованих газів з високою концентрацією тонкодисперсного пилю. На жаль, деякі види пилю складаються з частинок, настільки дрібних, що їх важко виділити з газу. Багато гази містять близько 100 мг / м³ твердих частинок.

Значні викиди газів, що відходять і пилю, що містять токсичні речовини, відзначаються на заводах кольорової металургії при переробці свинцево-цинкових, мідних, сульфідних руд, при виробництві алюмінію і ін. Найбільш токсичними компонентами відпрацьованих газів є сполуки фтору - фтористий водень і чотирихлористий кремній. Їх уловлювання з газів необхідно не тільки для захисту повітряного басейну від забруднення, а й для подальшої утилізації, оскільки фтор та його сполуки широко застосовуються в ряді галузей народного господарства - ядерній енергетиці, кольоровій металургії, скляній промисловості, промисловості органічного синтезу.

Комбінований режим живлення дозволяє істотно зменшити викиди аерозольних часток золи, а також викиди токсичних сполук фтору і сірковмісних газів при існуючій геометрії електрофільтра. Крім того імпульсне живлення

теоретично забезпечує в електрофільтрах такі переваги як - економію електроенергії, можливість очищення від активованих оксидів NO_x , SO_x

Аналіз фізичних процесів при комбінованому режимі живлення електрофільтрів

При такому підході імпульси короткої тривалості періодично накладаються на знижений рівень основного напруги. Такий імпульс є причиною хмари іонів, які заряджають частинки пилу, а постійна напруга осаджає їх. Часовий інтервал між імпульсами дозволяє стекти заряду на землю не викликаючи виникнення зворотного іонізації.

Існуюча зарубіжна практика використання комбінованого режиму живлення електрофільтрів з накладенням на постійну напругу імпульсної складової з мікро - чи мілісекундної тривалістю імпульсів свідчить про те, що комбінований режим може дозволити істотно зменшити викиди аерозольних часток золи при існуючій геометрії електрофільтра. Крім того імпульсне живлення теоретично забезпечує в електрофільтрах такі переваги як - економію електроенергії, можливість очищення від активованих оксидів NO_x , SO_x [2].

Останні досягнення в розробці високовольтних імпульсних генераторів, що використовують комутатори з ресурсом в тисячі годин безперервної роботи, дозволяють генерувати імпульси напруги мікросекундної і наносекундної тривалості з напругою в кілька сотень кіловольт, з імпульсними струмами в сотні кілоампер. Розвиток елементної бази джерел живлення відкриває нові перспективи модернізації і реконструкції електрофільтрів підприємств металургії з використанням комбінованих режимів.

Живлення імпульсною напругою було спеціально розроблено для поліпшення уловлювання частинок з високим опором, осідання яких призводить до виникнення ефекту зворотньої іонізації. Таке живлення загалом складається з коротких високовольтних імпульсів накладених на знижену "базову напругу". Імпульсна система розроблена для однозонного фільтра працює з двома довжинами імпульсів 1 мкс і 100 мкс. Імпульси слідує з частотою від 1 до 400 Гц. Типова форма імпульсу напруги представлена на рис 1.1. при частоті 100 Гц, яка також включає рівень постійної напруги. У цьому відмінності стають зрозумілі, при імпульсному живленні вузький імпульс напруги має значну амплітуду. При ширині імпульсу в 100 мкс імпульсна напруга що прикладається до фільтру може бути значно вище ніж постійне без виникнення проблем, пов'язаних з пробоем проміжку. Амплітуда піка напруги є сумою амплітуди імпульсу напруги і рівня постійної напруги, який встановлюється близьким до напруги запалювання коронного розряду[3].

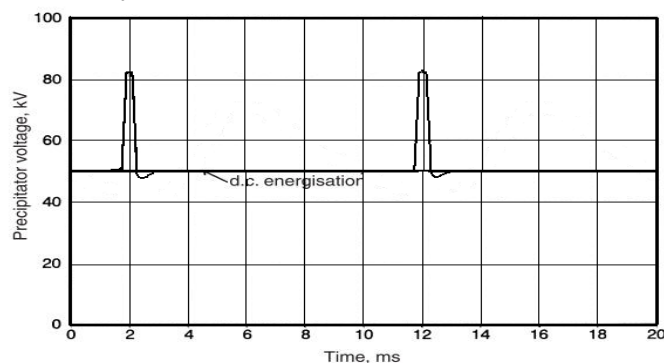


Рис 1 Форма імпульсу напруги

Як показано на рис 1.1 імпульсна система виробляє вузькі високовольтні імпульси які накладаються на базову напругу; таким чином мінімум два джерела живлення необхідні для більшості пристроїв, одне джерело для імпульсної напруги і друге для постійної. Більш того регулювання амплітуди імпульсів, рівня постійної напруги, частоти можливо при використанні певного методу, що вимагає спеціальну систему управління для реалізації цих функцій. Принципово, розрізняють дві архітектури джерел імпульсного живлення, перша заснована на комутації енергії на низьковольтній стороні трансформатора інша заснована на комутації енергії на високовольтній стороні. Перша топологія використовує два джерела напруги перший для створення імпульсної напруги, другий для створення рівня постійної напруги і роздільні системи управління: одна для імпульсного джерела друга для джерела постійної напруги. Друга топологія часто використовує одну систему управління і один джерело живлення - стандартний джерело постійної напруги. Обидві топології використовують послідовний резонансний LC ланцюжок, в якій фільтр виступає в ролі ємності. Високовольтний ключ, часто потужний тиристор, що має в своєму складі антипаралельний діод службовець для захисту тиристора від пробоя. Інше рішення, протилежне живлення одиночними імпульсами, використовує пакет коротких імпульсів, що передаються при розрядці індуктивності/ємності в вторинну ланцюг, таке рішення називається багатоімпульсною. Робота багатоімпульсної системи дуже схожа на роботу одноімпульсної системи. Для теоретичного обґрунтування електроіонізаційних способів очищення атмосфери від високодисперсної пилу необхідний докладний аналітичний опис зв'язку між заряда-

ми частинок і вхідними змінними: масою, розмірами, формою і речовим складом частинок, часом зарядки, вологістю, температурою, тиском і хімічним складом атмосфери, параметрами коронного розряду.

Величина зарядів частинок, придбаних ними в полі коронного розряду, визначається двома процесами: спрямованим рухом іонів до частинки під дією зовнішнього електричного поля (процес ударної зарядки) і дифузії іонів до поверхні частинки. Залежно від розмірів частинок перераховані процеси відіграють різну роль.

Вираз, що описує процес зарядки пилу в полі уніполярного коронного розряду має такий вигляд [4]:

$$g = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E_0 \rho^2 \frac{\pi k n_0 t}{4\pi\epsilon_0 + \pi k n_0 t} + \rho \frac{4\pi\epsilon_0 k T}{e} A(n_0 t) \quad (1)$$

Де E_0 - напруженість зовнішнього електричного поля, В / м; ρ - еквівалентний радіус частинки, м; k - рухливість іонів, м² / В · с; e - заряд іона, Кл; n_0 - концентрація іонів в невозмущенній середовищі, м-3; t - час зарядки, с; $A(n_0 t)$ - тимчасова функція, що характеризує швидкість дифузійного процесу зарядки; T - період зміни величини заряду; ϵ_0 - відносна діелектрична проникність частки.

Аналіз виразу (1) показує, що забезпечити різну інтенсивність зарядки великих і тонких фракцій аерозолі можна шляхом зарядки частинок пилу при різних рівнях напруженості електричного поля коронного розряду. Це можливо через відмінність характеру залежностей зарядів тонкої і грубої фракції від напруженості зовнішнього електричного поля E_0 . Потрібно забезпечити тривалість процесу зарядки і концентрацію іонів в камері, достатню для придбання тонкої фракцією зарядів, близьких до граничних.

Заряди великих частинок при цьому можуть бути істотно менше від граничних, що виключає їх осадження і накопичення в зарядній камері, а в подальшому не впливає на процеси коагуляції дрібнодисперсної фази аерозолі.

Зі сказаного вище випливає, що існує можливість забезпечити різну інтенсивність зарядки великих і тонких фракцій аерозолі шляхом зарядки аерозолі в полі коронного розряду з періодичною зміною його напруженості від $E_{0\max}$ до нуля.

Розробка схеми для комбінованого режиму живлення електрофільтрів

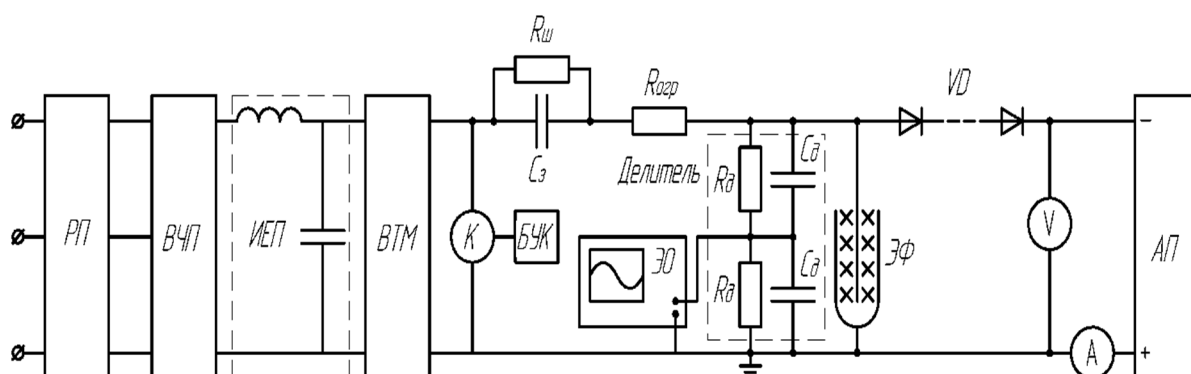


Рис. 2 Принципова схема підключення ІДЖ

РП - Регулятор живлення; ВЧП - Високочастотний перетворювач;
ІЕП - Індуктивно-ємнісний перетворювач; ВТМ - Випрямляч-трансформатор масляний; К- Комутатор; БУК - Блок керування комутатором;
Rш - Опір шунтуючий; Сз - Ємність зарядна; Rогр - Опір обмежувальний;
Rш - Опір шунтуючий; ЕО - Електронний осцилограф; ЕФ - Електрофільтр;
VD - Діодна зборка; АП - Агрегат живлення штатний.

Складено схему імпульсного джерела комбінованого живлення електрофільтра (Рис. 2), яка містить комутатор, який дозволяє регулювати амплітуду вихідної напруги в діапазоні 0 - 75 кВ, частоту імпульсів 1 - 10 Гц, тривалість імпульсів 20 мкс, швидкість наростання переднього фронту імпульсів напруги не менше 1 кВ/нс. За прийнятою схемою з'єднання зі штатним агрегатом живлення, що створює амплітудну напругу на полях електрофільтра 50 кВ, підключення імпульсного джерела може забезпечити сумарна напруга 0 - 125 кВ, з регульованим числом постійної складової в діапазоні 0 - 50 кВ та імпульсної складової в діапазоні 0 - 75 кВ. Середня потужність імпульсного джерела - 15 кВт при коефіцієнт корисної дії 0,75, споживаний струм в первинній обмотці - до 40 А.

Була проведена експериментальна перевірка даних теоретичних положень за допомогою установки, що реалізує комбінований режим живлення електрофільтра (Рис.2).

На електродній системі, за допомогою штатного агрегату живлення, встановлювалась постійна напруга починаючи від нуля і до максимально можливого - 45 кВ, через кожні 5 кВ на неї накладалась імпульсна напруга. Результати експериментальної перевірки наведені в табл 1

Табл. 1 Результати експерименту

	Напруга U постійна, кВ	Напруга U імпульсна, кВ	Струм, мА
Частота 3,5 Гц			
	0	35	0
	20	0	0
	20	15	3
	30	20	10
	35	20	12
	35	30	15
	40	0	5
	40	15	12
	40	20	13
	40	25	15
	40	30	18
	45	15	12
	45	20	13
	45	25	20
	45	30	23
Частота 5 Гц			
	20	15	3
	30	15	5
	48	15	17
	48	20	19
	48	25	20
	48	30	21
	48	35	25
	48	38	30

Характерна осцилограма напруг і струмів на електрофільтрі при $U_{\text{пост.}} = 48$ кВ і $U_{\text{імп.}} = 38$ кВ наведена на рис 3.

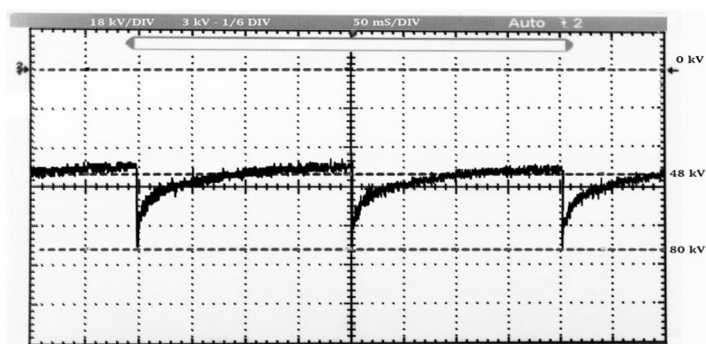


Рис. 3 Характерна осцилограма напруг і струмів на електрофільтрі при накладенні імпульсної складової на постійну напругу штатного АП.

Як показують виміри напруг і струмів, при загальній напрузі близько до 80 кВ, напруга припиняє зростати при збільшенні струму до 30 мА. Це може бути непрямим підтвердженням виникнення позитивної корони з торців осадних електродів. Останні є протиелектродами коронуючим електродам предзарядки.[6]

При штатному режимі живлення електрофільтра при максимальній середній напрузі 45 кВ і середньому струмі 5 мА, потужність передана в електрофільтр становить:

$$P = U \times I = 45 \times 10^3 \text{ В} \times 5 \times 10^{-3} \text{ А} = 225 \text{ Вт} \quad (2)$$

При комбінованому режимі живлення, потужність передана в електрофільтр становить близько 10 кВт, що в 40 разів більше, ніж при штатному режимі живлення.

Було доведено, що ефективність електрофільтра залежить від потужності переданої в електрофільтр. На рис. 4 наведено графік залежності ефективності уловлювання летючого попелу електрофільтром залежно від переданої потужності[5].

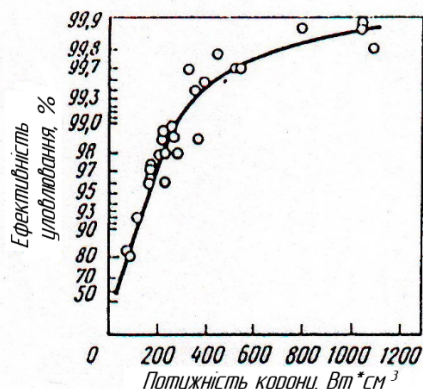


Рис. 4 Залежність ефективності уловлювання летючого попелу електрофільтром від переданої потужності

Використання комбінованого режиму живлення електрофільтрів дозволяє істотно збільшити потужність, передану в електрофільтр (в 40 разів) і призведе до істотного зниження викидів летючого попелу.

Висновки. Мною було розглянуто аналітичний огляд питань газоочищення промислових викидів та питань розробки й дослідження режимів живлення електрофільтрів.

Показані переваги імпульсного живлення електрофільтрів, які полягають в економії електроенергії; корекції виникнення зворотньої корони і управління її інтенсивністю та підвищення ефективності очищення.

Запропоновано комбінований режим живлення електрофільтрів, суть якого полягає в тому, що імпульси короткої тривалості накладаються на постійну складову. Показані переваги комбінованого режиму живлення електрофільтрів.

Була розроблена схема для комбінованого режиму живлення електрофільтрів

Було експериментально доведено, використання комбінованого режиму живлення електрофільтрів дозволяє істотно збільшити потужність, яка передається в електрофільтр, що призводить до істотного зниження викидів летючого попелу.

Список використаних джерел

1. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., Химия, 1967.
2. Токарев А.В. Коронный разряд и его применение.- Бишкек: КРСУ, 2009.
3. Чекалов Л.В. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов, Ярославль, Русь, 2004.
4. Попков В.И. Электрическое поле при переходной униполярной короне Известия АН СССР, отделение технических наук. №7, 1954.
5. Богуславський Л.З. Технічний звіт проведення випробувань комбінованого режиму живлення електрофільтрів блоку ст. № 7Б I ст. № 7А з накладанням на постійну складову напруги імпульсної складової з мікросекундою тривалістю імпульсів, 2011.

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД	3
<i>Тарабанов М.Р., Скороходов В.А.</i> Проблеми застосування систем безконтактної зарядки електротранспорту при наявній похибці позиціонування.....	3
<i>Жук О.К., Равінський К.А., Золотченко В.В.</i> Аналіз рішень для зарядки суден на електроживленні	7
<i>Жук О.К., Дзисюк Я.В., Буряк В.С.</i> Удосконалення зарядних технологій для акумуляторних морських суден.....	9
СЕКЦІЯ 2. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД	15
<i>Фоменко Л.А., Гараєв К.Р., Бондар В.С., Беляшкін М.С., Лопухов О.О.</i> Стенд для магістерських досліджень з електроприводів	15
<i>Великий О.Ф., Главацький Д.О., Єремєєв В.П., Лук'янчук А.Р., Станіслав А.І.</i> Мікропроцесорна система керування електроприводами промислового обладнання	17
<i>Захаренко М.І., Булацевський Д.В., Запорожець А.Г., Мередов Я.С., Попадюк Т.О., Гапчук О.О.</i> Система керування сервоприводами	19
<i>Холод П.А., Ридош Є.Є., Лановенко О.В., Мойсєєнко С.С., Стружук М.Я., Нуриєв І.Н.</i> Лабораторний стенд для дослідження роботи тахогенератора постійного струму.....	20
<i>Муштаєва Ю.Д.</i> Розробка автоматизованого електропривода стрічкового конвеєра	22
<i>Шуляк О.О.</i> Автоматизація електропривода головного руху токарного верстата	24
<i>Зайченковський О.Є.</i> Модернізація системи керування орієнтації гондоли вітрогенератора	27
СЕКЦІЯ 3. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ	31
<i>Нагорний А.К.</i> Особливості розвитку водневого господарства	31
<i>Рибін В.О., Ситніков А.О.</i> Тенденції застосування аморфних сплавів в магнітопроводах силових трансформаторів	34
<i>Бугайов Д.С., Голік С.Є., Тарасюк Г.П.</i> Аналіз варіантів комплектацій опускних і саморухомих підводних апаратів спеціальними трансформаторами	36
СЕКЦІЯ 4. ІМПУЛЬСНІ ПРОЦЕСИ І ТЕХНОЛОГІЇ	41
<i>Малюшевська А.П.</i> Підсилення електричного поля мікровістрям на поверхні плоскопаралельних електродів.....	41
<i>Козирєв С.С., Літвінов К.В.</i> Метод непрямої оцінки параметрів хвилі тиску при високовольтному розряді у конденсованих середовищах.....	44
<i>Конотопенко В., Травицький В.</i> Огляд діелектриків для створення силового конденсатора з підвищеною частотою проходження імпульсів.....	46
<i>Палига О.О.</i> Імпульсне джерело для комбінованого режиму живлення електрофільтрів підприємств чорної та кольорової металургії.....	51

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ



Згідно з бюлетенем ВАК України № 12 від 2009 року (с. 5); № 5 від 2010 року (с. 15); № 6 від 2010 року (с. 13) електронне видання «Вісник НУК» внесене до переліку електронних наукових фахових видань.

Видання виходить до 6 разів на рік в електронному вигляді та 1 раз на рік — у друкованому.

Матеріали, опубліковані у «Віснику НУК», зараховуються як фахові у галузях технічних та економічних наук.

Видання містить статті з результатами досліджень за групами спеціальностей: кораблебудування; обробка матеріалів у машинобудуванні; галузеве машинобудування; електротехніка; інформатика; обчислювальна техніка та автоматизація; техногенна безпека; енергетика; машинобудування; економіка та управління підприємствами.

<http://ev.nuos.edu.ua>

Для подання статті необхідні:

- експертний висновок про можливість опублікування;
- протокол засідання експертної комісії;
- витяг із протоколу засідання кафедри;
- рецензія на статтю;
- відомості про авторів (анкета автора);
- 2 примірники роздрукованої статті на папері формату А4;
- електронний варіант статті.

Статті приймаються за адресою:

каб. 551, просп. Героїв Сталінграда, 9,
м. Миколаїв, 54025

тел.: (+380512) 42-32-71

e-mail: ev@nuos.edu.ua

Контактна особа:

Крива Маргарита Сергіївна

Мова збірника: українська, російська,
англійська

Наукове видання

АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА – 2020

ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ

10-11 листопада 2020 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, проспект Центральний, 3

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

(українською та російською мовами)

Відповідальний за випуск:
Комп'ютерна верстка:

О. О. Черно
О. О. Черно

Видавець Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
проспект Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail: publishing@nuos.edu.ua
Свідectво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.