

УДК 621.319.54

## РЕЗОНАНСНА СИСТЕМА БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Вдовиченко А. В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: [full.throttle.go@gmail.com](mailto:full.throttle.go@gmail.com)

Рішення реалізації бездротової передачі за допомогою електромагнітної взаємодії представлені в таблиці 1. Найбільшого розповсюдження здобули пристрої, що використовують магнітне поле простого або резонансного типу [1]. Їх розробляють такі фірми, як WiTricity, Sony, Fulton Innovation та інші. Дальність роботи резонансних систем  $D_{\text{range}}$  не перевищує 10 лінійних розмірів випромінюючого контуру  $D_{\text{ant}}$ . В цих системах наявний вплив на біологічні об'єкти, що наразі активно досліджується в межах європейської метрологічної програми для інновацій та досліджень EMPIR та ін. [2]. Недолік таких систем – це необхідність центрально-осьового орієнтування, що робить деякі застосування, наприклад, підзарядку в русі – непрактичними. Рішення, що використовують електромагнітне випромінювання, реалізують фокусування вузького променя електромагнітної енергії, з довжиною хвилі  $\lambda$ , на приймачі за допомогою ФАР, ректен, лазерів та ін. Можлива дальність таких систем є найбільшою, проте біологічний та матеріальний вплив у випадку неточного позиціонування – надзвичайно високий. Відповідно, для практичного використання, придатні системи лише малої потужності [3]. Системи, що використовують електричне поле розробляють такі фірми, як Murata, Solace Power та ін. [4]. Дальність передачі близька до безрезонансних систем з використанням магнітного поля.

Таблиця 1. Рішення по реалізації безпроводної передачі електричної енергії

	Поле ближньої дії <i>Near – field</i>	Поле середньої дії <i>Mid- Field</i>	Поле дальньої дії <i>Far-field</i>
Відстань	$D_{\text{range}} \leq D_{\text{ant}}$	$D_{\text{range}} \leq 10 \cdot D_{\text{ant}}$	$D_{\text{range}} \geq \lambda$
Діюча складова	Магнітне поле <i>(Inductive)</i>	Резонанс магн. поля <i>(Resonant inductive)</i>	Електромагнітне випромінювання (радіохвилі, ФАР, ректени, лазери)
	Електричне поле <i>(Capacitive)</i>	Резонанс електр. поля <i>(Resonant capacitive)</i>	
Вплив	Низький	Середній	Високий

Резонансні системи з використанням електричного поля широко не представлені. Прикладом таких систем є розробки Ніколи Тесли [5]. В дослідженні [6] було виявлено, що випромінювання в таких пристроях може містити складову змінного магнітного поля та електромагнітну складову, а

основним діючим фактором є електричне поле. Недоліком таких пристроїв є те, що передавач та приймач послідовно під'єднанні до землі, що формує однопровідну систему передачі, в якій земля виконує роль провідника. Як було вказано в [7], можливе вдосконалення пристрою, що дозволяє перейти до повністю безпровідної системи передачі електричної енергії.

Дослідження характеристик випромінювання здійснено за допомогою вимірювача рівня електромагнітного поля Атакон АТТ-8509, що має діапазон вимірювання напруженості електричного поля від 0,01 до 200 В/м, та щільності потоку енергії від 0,001 до 99,999 Вт/м<sup>2</sup>.

Для випромінюючого контуру з резонансною частотою 565,8 КГц, зовнішнім діаметром  $D_{\text{ant}} = 0,2$  м, прикладеною середньоквадратичною напругою генератора 100 В, та потужністю споживання 25 Вт, при фонових показниках напруженості електричного поля 4,5 В/м та щільності потоку енергії 0,06 Вт/м<sup>2</sup>, було проведено вимірювання напруженості електричного поля  $E_1$  та  $E_2$  та щільності потоку енергії  $P_1$  та  $P_2$  в двох протилежних напрямках від центру резонуючого контуру. Результати вимірювання та результати апроксимацій, що проведені відносно середніх значень напруженості електричного поля  $E_{\text{mean}}$  та щільності потоку енергії  $P_{\text{mean}}$  на відстані 2 м представлені на рисунку 1. Враховуючи результати вимірювання, можна стверджувати, що діючим фактором є змінне електричне поле. Напруженість електричного поля зменшується обернено пропорційно квадрату відстані, а щільність потоку енергії має обернену залежність четвертого ступеня від відстані.

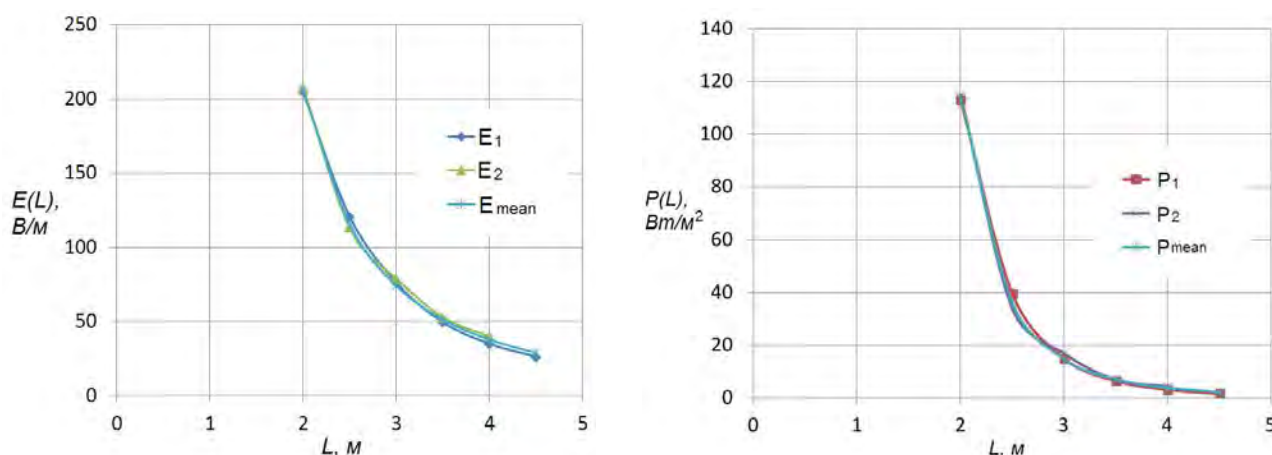


Рис. 1. Графіки зміни напруженості електричного поля  $E(L)$  та щільності потоку енергії  $P(L)$  залежно від відстані  $L$

Підсилюючий генератор формує меандр, що розкладається на нескінечний ряд затухаючих непарних гармонік. Дослідження спектральних та резонансних характеристик резонуючого контурів здійснено за допомогою спектрального

аналізатора RIGOL DSA815 та цифрового осцилографа SIGLENT SDS1102CML. Результати дослідження резонансних частот представлені в таблиці 2. Як видно з даних таблиці, кожна наступна резонансна частота відстає від кратного непарного номера гармоніки на певний коефіцієнт уповільнення. Випромінювання кожної наступної гармоніки буде послаблюватись все сильніше. Повністю виключити вплив вищих гармонік можна використовуючи підсилюючий генератор, вихідний сигнал якого є чистою синусоїдою.

Таблиця 2. Резонансні частоти випромінювача

Номер гармоніки	Частота гармоніки, КГц	Резонансна частота антени, КГц	Коефіцієнт уповільнення
1	146,7	146,7	
3	440,1	384,6	0,87
5	733,5	609,4	0,83

Резонансна бездротова система з використанням електричного поля має сферичну діаграму направленості, що дозволяє створити пристрій, придатний для живлення мобільних систем, безпілотних засобів транспортування, безконтактних датчиків та пристроїв для рухомих деталей механізмів.

*Ключові слова:* електричне поле, резонанс, бездротова передача енергії.

#### **Література**

- [1] J. D. Joannopoulos, A. Karalis, and M. Soljacic, “Wireless non-radiative energy transfer”, *Patent US 10,666,091*, 2020.
- [2] M. Zucca, B. Loader, M. Schmidt, J. Welinder, K. Tammi, J. Bruna Romero, L. Pichon, F. Freschi, P. Bauer, V. Blandow, A. Maffucci, N. Femia, and N. Kuster, “The project “Metrology for Inductive Charging of Electric Vehicles””, in *Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, July 2018, pp. 770–771. DOI: 10.1109/CPEM.2018.8501202.
- [3] S. Shyma, and E. Sindhuja, “Wireless Power Transmission from Solar Power Satellite”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 5, Issue 2, February-2014 ISSN 2229-5518.
- [4] Nagesh Polu, Mohammed Jahangir Alam, Sheikh Mominul Islam, and Nima Soltani, “Wireless electric field power transfer system, method, transmitter and receiver therefor”, *Patent US 2019/0165612*, 2019.
- [5] N. Tesla, “Apparatus for transmission of electrical energy”, *Patent US 649,621*, 1900.
- [6] G. E. Leyh, and M. D. Kennan, “Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators with Coupled Electric Fields”, in *40th North American Power Symposium 17th*, Calgary, 2008.
- [7] A. V. Vdovychenko, and Y. M. Tuz, “Power Measurement at Wireless Transmission of Electricity in the Frequency Range from 0.01 to 10 MHz”, in *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2018)*, Paris, France, July 2018, pp. 75–76. doi:10.1109/CPEM.2018.8500807.

УДК 621.3

## ЩОДО ПОРЯДКУ ОБЧИСЛЕННЯ ЧАСУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

<sup>1)</sup> Добролюбова М. В., <sup>2)</sup> Шевкун С. М.

<sup>1)</sup> Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»); <sup>2)</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
E-mail: [m.dobroliubova@kpi.ua](mailto:m.dobroliubova@kpi.ua), [shevkun@ukrcsm.kiev.ua](mailto:shevkun@ukrcsm.kiev.ua)

Станом на теперішній час наша країна живе за правилом – переводити стрілки годинника двічі на рік: на одну годину вперед в останню неділю березня о 3.00 та на одну годину назад в останню неділю жовтня о 4.00 [1]. Навколо цього правила ведуться постійні дискусії, які мають аргументацію як щодо його збереження, так і щодо відміни: географічна протяжність території України зі сходу на захід, порушення сталих добових ритмів біологічної активності людини, проблеми у транспортному забезпеченні, максимально ефективного використання світлої частини доби протягом року, порядок обчислення часу в суміжних країнах тощо [2]. Навіть у поточному році Верховною Радою України розглядалось дане питання – якби більшість депутатів проголосувала за зміни до постанови Кабінету Міністрів України про обчислення часу в Україні (законопроект № 4201), то українці не переводили б годинники на літній час [3].

Авторами наведено результати досліджень щодо максимально ефективного використання світлої частини доби протягом року для більшості населення України [4, 5].

В першу чергу, слід зазначити, що наразі через те, що близько 95 % території України знаходиться у другому часовому поясі, час, визначений в нашій країні, відповідає саме йому (Київський час). При цьому незначна частина Закарпаття знаходиться у першому часовому поясі; частина Харківської області, Луганська та майже вся Донецька – у третьому. Таке територіальне розміщення відносно часових поясів є сприятливим для використання часу одного часового поясу – другого. А от застосування на території України двох або навіть трьох часових поясів неминуче призведе до плутанини у громадян, суб'єктів господарювання всередині країни, зовнішніх партнерів тощо.

По-друге, щільність населення зі сходу на захід України є нерівномірною. Цей факт ускладнює досягнення максимально ефективного використання світлої частини доби протягом року для більшості населення. Відомо, що активна фаза соціального ритму більшості людей приходить на період з 7 години ранку до 22 години вечора, і якщо світловий день не співпадає із вказаним періодом, то вважається, що ефективність використання світлого часу

добі знижується. Проведені авторами дослідження показали, що при використанні в Україні відліку часу за другим часовим поясом (з переходом на літній час) найбільша тривалість втраченої частини світлового дня спостерігається влітку у східній частині України через те, що Сонце сходить приблизно о 4.25, а активний день розпочинається о 7.00. При використанні в Україні відліку часу за другим часовим поясом (без переходу на літній час) тривалість втраченої частини світлового дня влітку в центральній частині України становить близько двох годин, а у східній частині – близько двох з половиною годин. Це пояснюється тим, що у східній частині Сонце буде сходити, о 03.25, а сідати о 19.47, і активна життєдіяльність людей від цього часу до 22.00 буде відбуватися у темряві. При використанні в Україні відліку часу за третім часовим поясом (при переході на літній час без переходу на зимовий час) в західній частині України взимку Сонце буде сходити після 9.00 і діти йтимуть до школи в сутінках.

Результати досліджень показали, що при різних варіантах порядку обчислення часу найбільші втрати світлового дня мають місце при використанні в Україні відліку часу за другим часовим поясом (без переходу на літній час).

На думку авторів, обчислення часу на території України у відповідності до третього часового поясу (літній час без переходу на зимовий час), а також застосування регіональних графіків дозволяють:

- максимально ефективно використовувати тривалість світлового дня;
- підвищувати безпеку людей, забезпечуючи нормальні умови, щоб дістатися до місць роботи і навчання;
- знизити енергонавантаження і поліпшити екологічну ситуацію (кожна автівка витрачає на освітлення понад 0.1 л палива/годину);
- забезпечити стійку роботу єдиної енергосистеми країни, узгодженість міжнародних авіа- і транспортних сполучень, вантажопотоків і міжнародних зв'язків, організацію телекомунікацій.

Отже, при визначенні порядку обчислення часу повинні враховуватись не лише біологічна активність людини та дискомфорт внаслідок порушення її сталих добових ритмів, а і такі важливі фактори, як географічні особливості країни, організація інфраструктури, руху транспорту, виробництва, порядок обчислення часу в інших країнах, з якими Україна контактує в рамках міжнародного співробітництва.

*Ключові слова:* час, світлова частина доби, літній час, зимовий час, географічний часовий пояс

#### **Література**

- [1] Верховна Рада України. (1996, трав. 13). *Постанова Кабінету міністрів України № 509, Про порядок обчислення часу на території України.* [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/509-96-%D0%BF#Text>

- [2] “Порядок обчислення часу в Україні, країнах Європи та Співдружності незалежних держав”, *Український метрологічний журнал*, № 4, с.12-14, 1997.
- [3] Верховна Рада України. 4 сесія. (2020, жов. 09). *Проект Закону про обчислення часу в Україні*. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=70150](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=70150)
- [4] О. М. Величко, С. М. Шевкун, та М. В. Добролюбова, “Актуальні питання обчислення часу на території України”, на *Всеукр. наук.-тех. конф. молодих вчених у царині метрології “Technical Using of Measurement – 2018”*, Славське, 2018, с. 127-129.
- [5] Астрономічний календар 2020 [Електронний ресурс]. Доступно: [https://www.mao.kiev.ua/docs/artid080\\_calendar-2020.pdf](https://www.mao.kiev.ua/docs/artid080_calendar-2020.pdf)

УДК 621.313.33

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПІД ЧАС ЇХ РОБОТИ

<sup>1)</sup>Захарченко В. Д., <sup>2)</sup>Стаценко О. В.

<sup>1)</sup>ТОВ «PEATISS», Київ, Україна, <sup>2)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
E-mail: [vladyslav.zakharchenko1@gmail.com](mailto:vladyslav.zakharchenko1@gmail.com), [o.statsenko@kpi.ua](mailto:o.statsenko@kpi.ua)

Асинхронні двигуни (АД) на сьогоднішній день широко розповсюджені в різних галузях завдяки ряду переваг, таких як: надійність, масо-габаритні показники, економічність, вартість та інші. Асинхронні двигуни підходять практично для будь-яких комерційних і промислових застосувань завдяки простоті своєї конструкції і низькій вартості обслуговування.

Незважаючи на зазначені переваги АД, як і будь-які інші пристрої, вони час від часу виходять з ладу. За різними оцінками щорічно виходить з ладу і потребують заміни до 2 % від їх загальної кількості, а в деяких областях використання це число досягає 20-25 % [1]. Своєчасне виявлення несправностей дозволяє скоротити час для заміни або ремонту двигунів і попередити виникнення серйозних аварій, які можуть бути викликані цими несправностями. Тому роботи спрямовані на вдосконалення методів контролю та діагностики стану АД є актуальними.

Всі несправності АД можна розділити на дві групи: електричні та механічні. Електричні включають в себе пошкодження обмоток статора і ротора: тріщини або обриви стрижнів ротора, дефекти лиття ротора, тріщини в кільцях ротора, обрив обмотки статора, міжвиткові замикання в обмотках статора. Механічні несправності пов'язані з пошкодженням елементів конструкції двигуна, найчастішими з яких є пошкодження або руйнування підшипників, а також викривлення ротора [2].

Причини появи дефектів в асинхронних машинах пов'язані з низкою факторів, одними з яких є заводський брак, згубні впливи навантаження або навколишнього середовища, якість напруги живлення, людський фактор [3].

Наявність несправностей можна визначити за непрямими ознаками, такими як: перегрів двигуна, підвищена вібрація, несиметрія струмів живлення та інші. Однак такі ознаки можуть бути властиві й справним двигунам в специфічних режимах роботи, тому по ним не можна гарантовано визначити наявність несправності, і тим більше її причину.

Всі методи контролю стану АД можна розділити на дві групи: руйнівні і неруйнівні. Очевидно, що неруйнівні методи контролю та діагностики є кращими. Такі методи базуються на аналізі електричних змінних двигуна, частоти обертання, температури окремих елементів.

Відомі методики діагностики технічного стану АД [4], засновані на безперервному контролі температури окремих частин двигуна і порівнянні з температурою навколишнього середовища. Такий підхід дозволяє визначити наявність несправності, але не дозволяє ідентифікувати причину перегріву, тобто визначити фактор, через який відповідна частина двигуна перегрівається: через виткові замикання, обрив фаз обмоток статора (ротора), знос підшипників або інші причини.

Існують підходи, які базуються на аналізі струмів обмоток статора [2, 5]. Ці підходи засновані на тому, що при наявності несправностей двигуна і при його живленні від джерел напруги, з'являються пульсації струмів статора. Частота і амплітуда цих пульсацій залежать від типу пошкоджень. З огляду на наявність магнітного зв'язку обмоток статора і ротора, поява пульсацій струму при пошкодженні будь-якої з обмоток буде відображена в струмі статора. Також при пошкодженні підшипників або приєднаної механічної передачі формувалися імпульси електромагнітного моменту, що також призводить до зміни форми струму статора. Для виявлення точної причини несправності проводиться спектральний аналіз струму, і наявність окремих спектральних складових вказує на тип несправності. В [2] такий аналіз струму називається сигнатурним. У [5] розглядаються методики спектрального аналізу струму, в тому числі із застосуванням вейвлет-перетворень. Основним недоліком таких підходів є підвищені вимоги до апаратного забезпечення для їх реалізації. Крім того, в ряді випадків різні за характером несправності можуть призводити до появи ідентичних спектральних складових струму, що ускладнює процес ідентифікації несправності.

У роботі [6] розглядається підхід, який базується на використанні інтегральних значень електричних змінних двигуна: середньоквадратичних значень статорних струмів, напруг, активної і реактивної потужностей. В його основі лежить аналіз впливу різних несправностей на параметри еквівалентної схеми заміщення двигуна. Відповідно до цього аналізу значення активного опору обмотки статора залежить від наявності міжвиткових замикань, обриву окремих провідників і паралельних гілок, індуктивність розсіювання статора і індуктивність від головного магнітного потоку залежить від міжвиткових

замикань, активний опір обмотки ротора залежить від числа обірваних стрижнів. Порівняння результатів вимірювань реальних струмів, напруг, потужностей, а також коефіцієнта корисної дії і коефіцієнта потужності з результатами, отриманими для ідеалізованого випадку без несправностей, дозволяє визначити тип несправності і місце її виникнення. Недоліком такого підходу є обмежене число можливих несправностей, які можуть бути визначені, а також необхідність у проведенні значної кількості розрахунків для конкретного двигуна. Перевагою даного підходу є використання зв'язку між наявністю несправності і величиною параметрів двигуна, оскільки в сучасних системах регульованого електроприводу з короткозамкненим ротором реалізовані процедури самоналаштування, які дозволяють визначати параметри схеми заміщення.

На підставі зробленого аналізу можна зробити висновок, що існує велика кількість робіт присвячених різним методам і способам діагностики АД, кожен з них має свої переваги і недоліки. Очевидно, що для досягнення найкращого ефекту доцільним є комбінування різноманітних методів. Тому подальші дослідження слід присвятити розробці тестових процедур і систем для їх реалізації.

*Ключові слова:* асинхронний двигун, несправності, параметри, контроль, діагностика.

#### **Література**

- [1] Д. В. Полковниченко, “Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей”, *Електротехніка і Електромеханіка*, №1, с. 59-62, 2005.
- [2] Standard. *ISO 20958:2013. Condition monitoring and diagnostics of machine systems – Electrical signature analysis of three-phase induction motors*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.iso.org/standard/39839.html>
- [3] А. В. Луговой, М. Н. Максимов, Д. И. Родькин, А. П. Черный, та Г. Ю. Сисюк, “Эксплуатационная надежность электрических двигателей переменного тока и пути ее повышения” *Проблеми створення нових машин і технологій (Кременчуцький державний політехнічний університет)*, Вып. 1, с. 150-156, 2000.
- [4] Standard. *IEC 61857-32:2019. Electrical insulation systems – Procedures for thermal evaluation – Part 32: Multifactor evaluation with increased factors during diagnostic testing*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/4e26b0ce-2be3-483f-b6b3-1b6c4e82e963/en-iec-61857-32-2019#>!
- [5] А. В. Барков, та А. А. Борисов “Современные возможности диагностирования машины с электроприводом по току двигателя”, *Металлургические процессы и оборудование*, № 1 (31), с. 61-65, 2013.
- [6] Р. Г. Мугалинов, А. Р. Мугалинова, Ю. А. Калугин, та К. Э. Одинцов “Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования” *Електротехнические системы и комплексы*, 3 (40), с. 70-78, 2018.



УДК 66.078.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ГОЛОВНОГО РЕГУЛЯТОРА МУЛЬТИКОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ

*Кокошко Р. В., Кріль О. В., Кріль Б. А.*

*Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна*

*E-mail: [r.kokoshko151@gmail.com](mailto:r.kokoshko151@gmail.com), [oleksandr.v.kril@lpnu.ua](mailto:oleksandr.v.kril@lpnu.ua), [bohdan.a.kril@lpnu.ua](mailto:bohdan.a.kril@lpnu.ua)*

Стиснене повітря є важливим енергоносієм для наступних виробництв: висікання та формування виробів з тонколистових полімерних та металевих матеріалів, найрізноманітніших харчових технологій для приводу запірної арматури та роботизованих ліній, фармацевтичних виробництв. Такі виробництва споживають стиснене повітря в великих об'ємах і його одержання забезпечують потужні компресорні установки [1].

Процес одержання стисненого повітря потребує великих затрат енергії. На підприємствах країн Європи та Австралії компресорні установки для одержання стисненого повітря споживають до 10 % електроенергії від всієї споживаної підприємством, а в США цей показник сягає і до 30 % [2].

Комбіновану систему з декількох компресорних агрегатів з різними потужностями називають мультикомпресорною установкою для одержання стисненого повітря [2, 3]. Далі розглядається система керування мультикомпресорною установкою, яка видає стиснене повітря з тиском на рівні 6-8 бар, тобто, її призначення – живлення технологічного та керуючого обладнання виробництв, згаданих вище.

Типова мультикомпресорна установка складається з 3-4 окремих компресорних агрегатів, які працюють на спільний ресивер. Для забезпечення гнучкості керування такою установкою, привід одного з компресорних агрегатів оснащують частотним перетворювачем, а системи керування рештою агрегатів не міняються. В розглядуваній реалізації частотний перетворювач встановлений на компресорі з продуктивністю в номінальному режимі 1100 м<sup>3</sup>/год, споживаною потужністю 110 кВт. Межі зміни частоти напруги живлення двигуна після частотного перетворювача 25-50 Гц. Верхнє значення частоти може бути розширене до 60 Гц, якщо потрібно перекрыти продуктивності інших компресорів при перемикаваннях.

Керування такою мультикомпресорною установкою має здійснюватись від окремого головного регулятора при збережених локальних системах керування окремих компресорних агрегатів, приводи яких працюють в стаціонарному режимі з постійною частотою напруги живлення. Головний регулятор має виконувати наступні функції:

1. Формування завдання частотному перетворювачу приводу компресора, який працює в режимі зі змінним навантаженням.

2. Формування команд на ввімкнення або вимкнення в розвантаженому режимі компресорних агрегатів, які працюють з постійним навантаженням.

3. Подачу команд на перевід ввімкнених компресорних агрегатів з розвантаженого режиму в режим завантаження і навпаки.

4. Коректування завдання частотному перетворювачу приводу компресора, який працює зі змінним навантаженням, в моменти завантаження або розвантаження інших компресорних агрегатів.

В результаті досліджень встановлено, що для формування керуючих сигналів доцільно, крім значення тиску на виході спільного ресивера мультикомпресорної установки, задіяти сигнал про витрату споживаного повітря. В досліджуваній реалізації системи керування мультикомпресорною установкою застосовано витратомір змінного перепаду тиску, який забезпечив потрібну швидкодію. Для мінімізації втрат звужуючий пристрій – діафрагма, розраховувався на перепад тиску 6,3 кПа при максимальній продуктивності мультикомпресорної установки, а для розширення діапазону вимірювання застосовувався дифманометр з допустимим значенням основної зведеної похибки 0,1 %.

На основі експериментальних досліджень запропонована структурна схема головного регулятора системи керування мультикомпресорною установкою, яка зображена на рисунку 1.



Рис. 1. Структурна схема головного регулятора системи керування мультикомпресорною установкою для одержання стисненого повітря

Основний контур регулювання в цій схемі – контур регулювання тиску з ПІ регулятором, який формує завдання частотному перетворювачу компресора №1, залежно від завдання тиску та тиску повітря на виході мультикомпресорної установки. Блок математичних та логічних залежностей за сигналами про зміну тиску та витрати формує команди на ввімкнення/вимкнення компресорів №2 і №3 та переводу їх в режими завантаження/розвантаження. В моменти виконання цих дій блок аналізу швидкості зміни витрати та тиску і блок

формування зміни продуктивності коректують завдання частотному перетворювачу компресора №1.

Розроблена структурна схема та алгоритм роботи головного регулятора системи керування мультикомпресорною установкою реалізовані на вільнопрограмованому логічному контролері S7-1200.

На рисунку 2 зображений перехідний процес регулювання тиску на виході мультикомпресорної установки для одержання стисненого повітря на пивоварному підприємстві ПрАТ “Карлсберг Україна” (м. Львів).

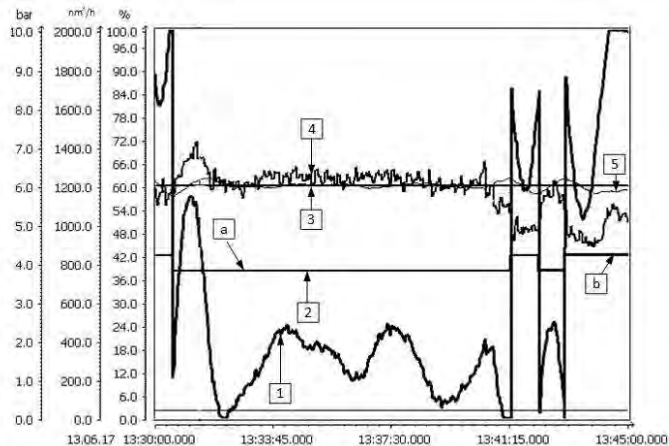


Рис. 2. Перехідний процес зміни тиску стисненого повітря на виході мультикомпресорної установки залежно від витрати повітря: 1 – завдання частотному перетворювачу (0-100 %); 2 – графік роботи компресора з постійною швидкістю двигуна (а - завантаження, б - розвантаження); 3 – завдання тиску; 4 – витрата повітря; 5– тиск повітря на виході мультикомпресорної установки

Графіки перехідних процесів показують, що при змінному споживанні стисненого повітря виробництвом немає втрати керування мультикомпресорною установкою, а зміни тиску стисненого повітря на виході мультикомпресорної установки в межах допустимих відхилень. Крім того, розроблений алгоритм керування зменшує кількість короткочасних ввімкнень компресорів, які працюють з постійною продуктивністю, і це збільшило їхній ресурс роботи. Разом ці досягнуті позитивні властивості призвели до зменшення споживання електроенергії на (підвищення енергоефективності процесу одержання стисненого повітря).

Запропонована структурна схема та алгоритм роботи головного регулятора мультикомпресорної установки впроваджені на пивоварному виробництві ПрАТ “Карлсберг Україна” (м. Львів) і експлуатуються на протязі двох років.

*Ключові слова:* мультикомпресорні установки, стиснене повітря, головний регулятор, перехідний процес, енергоефективність.

#### Література

- [1] Г. А. Бондаренко, та Г. В. Кирик, *Компресорні станції*. Суми, Україна: Сумський державний університет, 2016.
- [2] Smaeil Mousavi, Sami Kara, and Bernard Kornfeld “Energy Efficiency of Compressed Air Systems”, in *Proc. 21 st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 2014, pp. 313-318.

- [3] Jianjun Xu, and Yupeng Tang “The Automatic Control System of Air Compressor for Saving Energy”, in *Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference on Computer and Electrical Engineering*, 2012, vol. 53, pp. 382-386.

УДК 629.07.015

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
РЕЗОНАНСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИ ПОДОБНЫХ МОДЕЛЕЙ  
КРЫЛА САМОЛЕТА

*Митрахович М. М., Комаров В. А., Сащук С. И.*

*Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники  
Вооруженных Сил Украины, Киев, Украина*

*E-mail: [mmma777@gmail.com](mailto:mmma777@gmail.com), [vladimir@komarov.in.ua](mailto:vladimir@komarov.in.ua), [svyatoslavsaschuk@gmail.com](mailto:svyatoslavsaschuk@gmail.com)*

При решении задачи обеспечения надежности и экономичности современного самолета важная роль отводится экспериментальным методам исследования усталостной долговечности самолетных конструкций, в первую очередь таким, что воспринимают переменные нагрузки, в первую очередь – крыла. Поэтому к ним предъявляются высокие требования в отношении полноты и достоверности воспроизведения эксплуатационных нагрузок и получения выходной информации [1].

Указанное можно осуществить с помощью установок для усталостных и частотных испытаний крыла самолета, которые разработаны на основе обзора развития методов натуральных усталостных и частотных испытаний как по источникам научной информации, так и по патентным базам данных, где можно выявить как варианты конструктивного выполнения экспериментальных установок, так и методы силовозбуждения.

Поиск новых технических решений предлагается вести на основе двух основных методов натуральных испытаний – повторно-статистического и вибрационного (частотного). Повторно-статистический метод предполагает циклическое нагружение с постоянной амплитудой и малой скоростью смены циклов, исключающей возникновение динамических сил. В этом методе для создания сил нагружения можно использовать силовые гидроцилиндры. Достоинством повторно-статистического метода является простота получения усилий нагружения и возможность их варьирования от минимальной, до разрушающей. При вибрационном (частотном – с возбуждением колебаний конструкции с собственной частотой) методе нагружения циклическое изменение внутренних усилий крыла создается силами инерции основного тона изгибных (или крутильных) колебаний с собственной частотой. Вибрационному методу присуща высокая производительность при малых затратах времени на цикл исследования [2].

Таким образом, используя теоретические основы вышеизложенных методов и результаты патентного поиска, можно спроектировать реальную систему силовозбуждения, которая позволит обеспечить проведение статико-динамических усталостных испытаний и получить взаимосвязь между частотами собственных колебаний и фактической прочностью конструкции.

По материалам исследований было разработано устройство для возбуждения колебаний конструкции с собственной частотой, которое может при одном и том же оборудовании возбуждать колебания исследуемой конструкции с собственной частотой как изгибной, так и крутильной форм [3].

Указанное устройство представляет собой электродинамический вибровозбудитель с одномерной обратной связью и может быть использовано для исследования влияния повреждения силовых элементов конструкции (объекта контроля) как образцов и моделей (пластин и тонкостенных оболочек), так и натуральных конструкций (крыла, оперения, киля) – преимущественно консольно закрепленных конструкций [4].

Особенностью разработанного устройства, по сравнению с известными аналогами, является бесконтактность возбуждения – используется в качестве переменной возбуждающей силы сосредоточенное магнитное поле от силовых электромагнитов [5]. Развиваемое электромагнитами усилие передается на конструкцию через силопередающий рычаг (ферромагнитный якорь) малой массы, выполненный, предпочтительно, из магнитомягкого материала, на законцовках которого закреплены ферромагнитные накладки. Это позволяет уменьшить динамическое влияние системы силовозбуждения на выделение авторезонансной частоты.

Применяемый для частотных испытаний метод контроля частоты собственных колебаний (ЧСК) основан на применении для диагностирования конструкций физических колебаний, которые возбуждаются или возникают в объекте контроля (классифицируется по ГОСТ 23829-85, ГОСТ 15467-79 и по руководящему документу РД 25.002-80 как резонансный метод неразрушающего контроля (МНК)).

Испытательное оборудование для возбуждения колебаний динамически подобных моделей, которое использует метод контроля частоты собственных колебаний, обеспечивает стабильность поддержания частоты собственных колебаний (изгибных и крутильных) и заданную точность испытаний.

В комплексе со средствами измерений (контрольно-проверочной аппаратурой) испытательное оборудование, которое использует метод контроля частоты собственных колебаний, обеспечивает:

- определение частоты  $f$  собственных (авторезонансных) колебаний, амплитуды  $A$  колебаний и фазовых характеристик исследуемого колебательного процесса с требуемой точностью;
- регистрацию сигналов в требуемом диапазоне  $f$  и  $A$ ;
- возможность оперативного получения информации, как во время частотных испытаний, так и после окончания испытаний;

- возможность многократного использования и повторения;
- надежность в работе.

Особенностью метода контроля частоты собственных колебаний является то, что он позволяет возбуждать как изгибные, так и крутильные колебания объекта контроля (например, крыла, тонкостенной замкнутой оболочки, пластины) относительно оси жесткости, проходящей по оси в координатах центров жесткости сечений, без снятия (перемещения) составных элементов экспериментальной установки.

*Ключевые слова:* крыло, самолет, колебания, частота собственных колебаний, частотные испытания, резонансный метод, изгиб, кручение, вибрации, ось жесткости.

#### **Література**

- [1] Г. Н. Микишев, Н. Д. Пронин, Ю. Ю. Швейко, и др., “Оценка эффективности некоторых экспериментальных методов определения основных динамических характеристик упругих конструкций”, *Исследования по теории сооружений*, № 10, с. 85-100, 1970.
- [2] А. Л. Резник, “Определение форм и частот собственных колебаний самолёта”, *Труды ЦАГИ*, 1948.
- [3] В. О. Комаров, та О. О. Расстригін, “Пристрій для визначення просторово-частотних характеристик коливань консольно закріплених елементів літальних апаратів при їхніх випробуваннях на утомлену міцність”, *Пат. 127849, МПК (2018.01) В 64 С 3/00, G 01 М 7/00, G 01 В 11/26*, Серп. 27, 2018.
- [4] В. О. Комаров, А. І. Юзвенко, та Ю. О. Шпаківський, “Спосіб дослідження пружних властивостей консольно закріплених авіаційних конструкцій”, *Пат. 62473, МПК 7 G 01 М 5/00*, Груд. 15, 2003.
- [5] В. О. Комаров, В. А. Ткаченко, та В. І. Галушка, “Спосіб дослідження пружних властивостей тонкостінних консольно закріплених конструкцій літака”, *Пат. 120388, МПК (2017) G 01 М 5/00*, Жовт. 25, 2017.

УДК 603.493

## **ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ З БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ЩО МАЮТЬ БОЙОВІ ПОШКОДЖЕННЯ КРИЛА, НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

*Мітрахович М. М., Комаров В. О., Сащук С. І.*

*Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна*

*E-mail: [mmma777@gmail.com](mailto:mmma777@gmail.com), [vladimir@komarov.in.ua](mailto:vladimir@komarov.in.ua), [svyatoslavsaschuk@gmail.com](mailto:svyatoslavsaschuk@gmail.com)*

Основною проблемою сучасної військової авіаційної техніки Збройних Сил України є постійна загроза зниження рівня справності внаслідок недостатнього фінансування потреб на закупівлю запасних частин, паливно-мастильних і витратних матеріалів, відсутність авторського супроводу з боку конструкторських бюро розробників літальних апаратів (ЛА), недосконалості нормативно-правової бази щодо утримання озброєння та військової техніки, недосконалість методів діагностики і контролю технічного стану.

В напрямку забезпечення безпеки експлуатації авіаційного парку, особливо в умовах бойового застосування авіаційної техніки з бойовими пошкодженнями, важливим є методика оцінки впливу пошкоджень на частоту власних коливань конструкції ЛА, саме тому можливість оперативної діагностики технічного стану конструкції, що пошкоджені, встає на перший план. Вирішення зазначеного наукового завдання дозволить, з одного боку суттєво знизити ризики не використання можливостей ЛА, що пошкоджені, для виконання термінових бойових завдань, а з іншого боку – не допустити застосування ЛА, що є за межами безпечної експлуатації [1].

На всіх етапах експлуатації ЛА важко переоцінити роль теорії надійності, що забезпечує обґрунтоване прийняття рішень в процесі забезпечення і підвищення надійності ЛА. Основним завданням математичної теорії надійності є створення математичних моделей, що за можливістю більш точно відображають процеси функціонування досліджуваних реальних технічних систем. Під математичною моделлю будемо розуміти систему математичних рівнянь і логічних правил, користуючись якими можна отримати залежність обраного критерію надійності від усього різноманіття факторів, що впливають на надійність. Дослідження цих математичних моделей дозволяє зробити конкретні рекомендації щодо підвищення надійності літального апарату [2].

Таким чином, для розв'язання завдань оцінювання надійності й прогнозування працездатності об'єкта техніки, потрібно мати математичну модель, яку можна подати аналітичними виразами. Для отримання моделі потрібно провести випробування, обчислити статистичні оцінки та апроксимувати їх аналітичними функціями

Під час виконання розрахунків надійності зразків авіаційної техніки (АТ) працюють не з самим технічним виробом, наприклад, крилом літака, а з певним математичним об'єктом, що відображає найбільш істотні властивості реального виробу. Оскільки відмови техніки це випадкові події, що виникають унаслідок несприятливого розвитку випадкових явищ, математична модель надійності виробу має бути стохастичною, що відображає з достатньою точністю закономірності появи відмов у реальному виробі авіаційної техніки.

Природно, що та чи інша математична модель відображає ступінь пізнання технічної системи. Більш глибоке дослідження системи дозволяє будувати модель, яка більш відповідає реальній системі. Така модель виходить, як правило, більш складною. Але більш складна математична модель вимагає більш детальних вихідних даних, з одного боку, і більш тонких методів математичного дослідження – з іншого. Тому для більш точного вивчення досліджуваного об'єкта, виникає далеко не просте запитання про доцільність точності математичної моделі досліджуваної системи [3].

По-перше, розрахунки надійності функціонування таких складних технічних систем, який є ЛА в цілому і його складові елементи, наприклад, крило, приносять велику користь на різних етапах проектування ЛА, коли виникає питання про порівняння різних можливих варіантів і виборі

найкращого з них, а на більш пізніх етапах дозволяють перевірити правильність прийнятих рішень, знайти слабкі місця і виробити певні рекомендації щодо підвищення надійності.

По-друге, розрахункові методи (з проведення профілактичного обслуговування щодо організації контролю справності авіаційної техніки) можуть забезпечити найбільш оптимальний режим експлуатації АТ та бути незамінними, а часом і єдино можливими при необхідності діагностування технічного стану літальних апаратів.

Слід особливо підкреслити, що з ускладненням АТ використання математичних розрахункових методів буде більш ефективним на всіх етапах її експлуатації.

Система експлуатації авіаційної техніки за технічним станом обов'язковою умовою передбачає активне застосування засобів неруйнівного контролю для її діагностики. Тому з розвитком авіації суттєвих змін зазнали й методи і форми технічного обслуговування літальних апаратів (ЛА). У теперішній час технічне обслуговування бойових літаків розвивається в напрямках більш гнучких форм, щоб уникнути зайвих дорогих зупинок експлуатації техніки, особливо при веденні бойових дій, й гарантувати виявлення виниклих схованих дефектів, розвиток яких може привести до виходу ЛА з ладу. Можливість переходу до прогресивної системи обслуговування ЛА за технічним станом багато в чому визначається рівнем розвитку неруйнівних методів контролю [4].

Загальний ефект від використання неруйнівних методів контролю при технічному обслуговуванні авіаційної техніки (АТ) складається з переваг, отриманих в основному в результаті скорочення часу простою АТ при виконанні на ній регламентних робіт, пов'язаних із повною або частковим розбиранням через пошук дефектів і несправностей, і одержання більш об'єктивних відомостей про технічний стан конструкції.

Зазвичай профілактичний контроль пов'язаний з повним або частковим розбиранням АТ для доступу до систем і агрегатів, що цікавлять. Це суттєво підвищує вартість контролю, збільшує трудовитрати. Профілактичні контрольні операції на новій АТ призначаються, як правило, у великому об'ємі й більш частіше, ніж це дійсно необхідно, із залученням великого числа обслуговуючого персоналу. Забезпечення надійності таким шляхом стає усе більш затратним.

Ефективним засобом зниження вартості технічного обслуговування літаків можна вважати широке застосування для діагностики технічного стану ЛА методу контролю частот власних коливань (ЧВК) [5]. Метод контролю ЧВК повинен суттєво доповнити спектр методів, що широко застосовуються у цей час, такі як контроль за допомогою випромінювань, що проникають (рентгено й гаммаграфії), тому, що метод контролю ЧВК не вимагає узгодження з виконанням іншого виду регламентних робіт на літаку і може застосовуватися безпосередньо на аеродромі базування при веденні бойових дій.



*Ключові слова:* літальний апарат, надійність, неруйнівний контроль, діагностика, частота власних коливань, математична модель.

#### **Література**

- [1] О. І. Щепотьєв, та В. В. Щепетов, *Надійність авіаційної техніки*. Київ, Україна: НАУ, 2009.
- [2] А. Н. Сажин, “Методика и математические модели для обоснования требований к боевому самолёту с учётом обеспечения его живучести и повреждаемости при воздействии средств поражения”, *Вестник Самарского университета. Аэрокосм. техн., технол. и машиностр*, т. 17, № 3, с. 116-126, 2018.
- [3] В. Хейлен, С. Ламменс, и П. Сас, *Модальный анализ: теория и испытания*. Москва, Россия: ООО “Новатест”, 2010.
- [4] В. О. Комаров, “Методи прогнозування технічного стану бойових авіаційних комплексів”, на *Всеукр. наук.-практ. конф. Проблеми бойового та логістичного забезпечення складових сектору безпеки і оборони України*, Харків, 2020, с. 107-108.
- [5] В. О. Комаров, “Информационно-диагностическая система неразрушающего контроля для проверки технического состояния планера летательного аппарата” на *X Междун. науч.-практ. конф. Dynamics of the development of world science*, Ванкувер, 2020, с. 511-517.

УДК 629.07.015

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЯ ЧАСТОТИ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ І КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В УМОВАХ ОСОБЛИВОГО ПЕРІОДУ**

*Мітрахович М. М., Комаров В. О., Сацук С. І.*

*Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил  
України, Київ, Україна*

*E-mail: [mmma777@gmail.com](mailto:mmma777@gmail.com), [vladimir@komarov.in.ua](mailto:vladimir@komarov.in.ua), [svyatoslavsaschuk@gmail.com](mailto:svyatoslavsaschuk@gmail.com)*

В умовах ведення бойових дій прийняття рішення на випуск у політ ушкодженого літака повинне здійснюватися в мінімальний термін і з мінімальними працевитратами на ремонт. Це означає, що для кожного ушкодженого літака необхідно визначити фактичний запас міцності (залишкову міцність) і на підставі отриманих результатів діагностичного контролю зробити висновок про можливість його подальшої експлуатації - можливості виконання бойових вильотів з обмеженнями по ТТХ. Визначивши методами неруйнівного контролю (МНК), а саме, методом контролю частоти власних коливань, фактичну міцність конструкції, можна призначити їй комплекс необхідних операцій з відновлення її міцності. Визначення при цьому обсягу робіт з відновлення характеристик міцності конструкції на кожному конкретному літаку, дозволить перерозподілити особовий склад ремонтних підрозділів на більш трудомісткі ділянки робіт [1].

Загальний ефект від використання МНК при технічному обслуговуванні авіаційної техніки (АТ) складається з переваг, отриманих в основному в

результаті скорочення часу простою АТ при виконанні на ній регламентних робіт, пов'язаних з повним або частковим розбиранням для пошуку дефектів і несправностей, і одержання більш об'єктивних відомостей про технічний стан конструкції.

Оперативність діагностування залишкової міцності консольно закріплених конструкцій планера літака, насамперед, крила, може бути досягнута шляхом використання передових за технологією і простотою методів неруйнівного контролю, заснованих як на зміні частот авторезонансних вигинних і крутильних коливань при наявності ушкоджень, так і на зміні характеристик міцності конструкції (стосовно еталонних частот і діагностичних параметрів, характерних показникам жорсткості, замірним на свідомо неушкодженій конструкції) [2]. Частоти власних коливань (вигинні й крутильні) найбільше вірогідно дозволяють відбити динамічну індивідуальність конструкції тому, що здатні з великою точністю видавати інформаційні характеристики. Тому бажано проводити вимір частоти власних (авторезонансних) коливань не тільки вигину, але й крутіння тому, що момент зі зменшенням жорсткості крила збільшується. Це в польоті призведе до збільшення кутів закручування крила й, як наслідок, до погіршення його несучих властивостей. Експериментально можна встановити мінімальну частоту власних (авторезонансних) коливань обох видів, що буде відповідати мінімально припустимій залишковій міцності конструкції, при якій ще можлива експлуатація даного літака.

Оскільки практики застосування такого методу контролю технічного стану конструкції літального апарата ще не набуто, будь-який практичний досвід його застосування буде корисним для підвищення ефективності контролю і можливого спрощення процедури одержання даних. Застосування методу не замінює інші методи неруйнівного контролю, а лише їх доповнює.

Таким чином, важливою особливістю методу контролю частоти власних коливань консольно закріплених елементів конструкції літального апарата, у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю, є спроможність виявлення пошкоджень у місцях, недосяжних до огляду і доступу. Застосування методу не потребує високоточного обладнання для збудження коливань і вимірювання частоти. Технологічний процес отримання даних не перевищує 10-15 хвилин, що включає в себе підготовку обладнання. Можливості методу можуть бути збільшені в разі комплексного застосування разом з іншими методами неруйнівного контролю.

З огляду на зазначене вище, практичне застосування методу контролю технічного стану конструкції літального апарата дозволить визначити умови безпечної експлуатації елементів конструкції літального апарату, що консольно закріплені і мають наявність пошкодження в силових елементах включаючи бойові. Ці методи можуть бути ефективно використані в авіаційних стройових частинах для проведення інженерно-авіаційного забезпечення бойових дій авіації з метою забезпечення максимальної кількості бойових вильотів, підтримання високої надійності авіаційної техніки і відновлення в найбільш

короткі терміни літаків, що отримали бойові і експлуатаційні ушкодження, для прийняття рішення посадовими особами на випуск несправного (що має пошкодження) літака в екстрений політ. Що стосується ремонту літального апарату, то метод контролю частоти власних коливань консольно закріплених елементів конструкції літального апарату може бути використаний в авіаційних стройових частинах при ремонті авіаційної техніки в ході бойових дій при попередній оцінці технічного стану пошкоджених літаків для розподілу інженерно-технічного складу на виконання ремонтних робіт, встановлення режиму та порядку виконання робіт на авіаційній техніці, що забезпечують виконання поставлених бойових завдань, забезпечити вибір того методу ремонту, що дозволить здійснити ремонт авіаційної техніки в задані терміни і з найменшими витратами сил і засобів, та при остаточній оцінці її технічного стану для прийняття рішення на приведення літального апарату в боєздатний стан. Рішення вищезазначених наукових завдань дозволяє закласти науково-технічні основи для розробки і створення сучасних систем контролю технічного стану елементів конструкції ЛА з бойовими пошкодженнями, що є безсуперечною передумовою щодо ефективного виконання ними задач за призначенням [3].

Подальші дослідження піднятих в роботі напрямів оцінювання й відповідного вдосконалення систем контролю технічного стану консольно закріплених типових конструкцій планера літального апарату з використанням параметру зміни частоти власних коливань можуть розвиватися та удосконалюватися як за кожним з типів, так і інших систем озброєння та військової техніки. Так, при подальших дослідженнях систем діагностування технічного стану систем озброєння та військової техніки з використанням параметру частоти власних коливань доцільно, в першу чергу, забезпечити автоматизацію процесу визначення межі безпечної експлуатації за допомогою обчислювальних машин, створення моделей, що забезпечують проведення моніторингу і глибокого аналізу стану техніки, залежно від режиму розміру, місця бойового пошкодження і інших експлуатаційних факторів.

*Ключові слова:* літальний апарат, крило, технічний стан конструкції, діагностування, авторезонансна частота, запас міцності.

#### **Література**

- [1] И. А. Биргер, *Техническая диагностика*. Москва, СССР: Машиностроение, 1978.
- [2] Ю. В. Киселев, Д. Ю. Киселев, и С. Н. Тиц, *Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники*. Самара, Россия: и-во Самар. гос. аэрокосм. у-та, 2012.
- [3] Л. И. Волков, *Управление эксплуатацией летательных комплексов*. Москва, СССР: Высш. школа, 1981.

УДК 621.317

## ПОБУДОВА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМ МАГНІТОМЕТРОМ

*Почернін С. П.*

*Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил  
України, Київ, Україна  
E-mail: [vstandard@ukr.net](mailto:vstandard@ukr.net)*

Експериментальний магнітометр призначений для дослідження тривимірної структури розподілу магнітних полів постійних магнітів, електромагнітів, конструкційних елементів електричних машин, інших магнітних матеріалів тощо шляхом вимірювання їх магнітної індукції. Даний магнітометр може бути заснований в прикладних дослідженнях, конструюванні різноманітних пристроїв на постійних магнітах та під час освітнього процесу [1, 2].

Дія експериментального магнітометра заснована на вимірюванні магнітної індукції предмету, який досліджується, за допомогою датчиків Холла, відповідно кожної складової просторового розподілу магнітного поля.

Експериментальний магнітометр складається з прямокутної рами з рухомою предметною платформою, рухомої штанги з блоком датчиків та блоку управління. АСУ експериментальним магнітометром включає в себе блок датчиків, блок управління та комп'ютер зі спеціальною прикладною програмою. В цілому кінематична схема механічної частини експериментального магнітометра не відрізняється від типових кінематичних схем 3D-принтерів. В деяких випадках, наприклад, для дослідження магнітних полів предметів циліндричної або іншої подібної форми, які мають порожнини та отвори, доцільно застосувати кінематичну схему на полярних координатах з платформою, яка обертається навколо вертикальної або поздовжньої осі.

Блок датчиків являє собою куб з немагнітного матеріалу, на якому закріплені 3 вимірювальних датчика Холла типу SS49E у трьох взаємно перпендикулярних площинах.

Блок управління складається з двох субблоків: субблоку вимірювань даних, які надходять від блоку датчиків та субблоку керування позиціонуванням блока датчиків. Субблок вимірювань побудований на базі мікроконтролера STM32; субблок керування позиціонуванням – на базі плати Arduino з платою управління кроковими двигунами. Блок управління пов'язаний з комп'ютером через шину USB. Дані вимірювань передаються в комп'ютер для подальшої обробки за допомогою спеціальної програми, яка, відповідно, видає команди керування для позиціонування блока датчиків.

В результаті проведення циклу вимірювань утворюється масив даних вимірювань розподілу напруженостей магнітного поля від предмету, який досліджується, що дозволяє отримати візуальну “карту” структури магнітного поля від предметів складної форми. Отримані пошарові зображення розподілу напруженостей магнітного поля можуть допомогти при побудові та

налаштуванні складних пристроїв з магнітними компонентами, при проведенні відповідних фізичних експериментів.

*Ключові слова:* автоматизована система управління, мікроконтролер, магнітометр.

#### **Література**

- [1] Е. Г. Андреева, И. А. Семина, и А. С. Орлов, *Исследование силовых характеристик магнитного поля гибридной магнитной системы с различными концентраторами*. Омск, Россия: ОГТУ, 2017.
- [2] Є. Л. Шилін, та О. В. Стаценко, “Лабораторний стенд для дослідження роботи програмованих інформаційно-вимірювальних систем”, на *XV Всеукр. наук.-практ. конф. Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні*, Київ, 2017, с. 103.

УДК 355.691.21

## **ОСОБЛИВОСТІ ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЕРЖАВНОЇ СПЕЦІАЛЬНОЇ СЛУЖБИ ТРАНСПОРТУ МІНІСТЕРСТВА ОБОРОНИ УКРАЇНИ У ВОЄННИЙ ПЕРІОД**

*Сендецький М. М.*

*Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил  
України, Київ, Україна*

*E-mail: [send.mm60@gmail.com](mailto:send.mm60@gmail.com)*

Пріоритетним завданням критичної інфраструктури, що складається з сукупності об'єктів інфраструктури, які є найбільш важливими для економіки та промисловості, є безпека будь-якої держави та її суспільства. Залізничний транспорт України є однією з важливих складових критичної інфраструктури, стратегічною галуззю вітчизняної транспортної системи.

У сучасних умовах залізничний транспорт, який є одним з головних видів у дорожньо-транспортному комплексі України, забезпечує основний обсяг загальних перевезень (понад 60 %) загального вантажообігу держави. Провідна роль залізничного транспорту в єдиній транспортній системі України збережеться і в ХХІ ст. [1].

Досвід останніх війн (в Іраку, Югославії, Лівані), аналіз бойових дій на сході України показує, що високоточною зброєю в перший період, так званого безконтактного ведення бойових операцій, уражаються найбільш важливі елементи інфраструктури, що мають оборонне значення. Для залізниць це в першу чергу, великі (позакласні) мости й залізничні вузли. Для прикладу під час бойових дій у Югославії силами об'єднаного угруповання військово-повітряних сил (ВПС) країн НАТО після двох масованих авіаційних ударів були зруйновані всі мости через річку Дунай. Також необхідно враховувати вплив на елементи транспортної системи диверсійно-розвідувальних груп і незаконних збройних формувань. Результатом нехтування зазначеного, транспортна система держави може повністю піддатися впливу й по бар'єрних

рубежах, буде розділена на ізольовані ділянки, що не дозволить забезпечити її експлуатацію [2].

Особливістю діяльності Державної спеціальної служби транспорту (ДССТ) Міністерства оборони (МО) України є те, що в мирний час вона приймає активну участь в розширенні та реконструкції транспортної мережі. У ході ж бойових дій питома вага військових перевезень залізничним транспортом за прогнозами військових експертів може становити до 80% їх загального обсягу. Тому, пріоритетним завданням служби є технічне прикриття, загородження і відновлення об'єктів, з метою успішного проведення операцій [3].

Основною організаційною одиницею ДССТ МО України здатною самостійно виконувати весь комплекс завдань з призначення є окрема бригада. Так як у воєнний час підрозділи ДССТ МО України будуть проводити комплекс робіт з відновлення та будівництва залізниць в інтересах збройних сил, то одним із важливих завдань є успішне технічне забезпечення цих робіт.

Мета тези є підвищення ефективності мобільних технічних засобів з відновлення елементів залізничної інфраструктури, за рахунок реалізації раціональних вимог до параметрів і складу перспективних зразків техніки.

Найбільш ефективним рішенням є комплексний підхід до оснащення служби технічними засобами і механізмами, залежно від умов що склалися, за різними технологічними способами ведення робіт [4].

Підхід до питання найбільш ефективного оснащення окремих загонів технічними засобами можливо уявити собі як вибір найкращих варіантів машин (комплексів), як за конструктивними, так і технологічними показниками. Важливим оперативним показником під час ведення відновлювальних робіт є сумарний час відновлення  $T_v$ .

Практичне впровадження цього алгоритму дає можливість підвищити оперативність роботи з відновлення елементів транспортної системи у воєнний період.

На основі проведеного аналізу пріоритету завдань ДССТ МО України в єдиній транспортній системі України в зоні військового конфлікту на сході України, розвитку залізничної інфраструктури в особливий період, запропоновано в основу створення універсального комплексу принцип «гнучкої» технології ведення робіт оснований на теорії розвитку гнучкого автоматизованого виробництва, обґрунтована необхідність переоснащення підрозділів технічними засобами.

Проведені теоретичні дослідження не до кінця вирішують як проблему удосконалення способів відновлення елементів залізничної інфраструктури, так і створення нових технічних засобів і будуть служити підґрунтям до продовження подальших досліджень з удосконалення організаційно - штатної структури ДССТ МО України з використанням запропонованого підходу, а також залучення сил та засобів, як для забезпечення сталого функціонування об'єктів залізничного транспорту в умовах надзвичайних ситуацій, так і для покращення логістичного забезпечення.

*Ключові слова:* критична інфраструктура, залізничний транспорт, відновлення елементів транспортної системи.

**Література**

- [1] М. І. Мальков, “Роль залізниць та залізничних військ України у системі національної безпеки”, *Наука і оборона*, № 3, 2002.
- [2] М. М. Сендецький, В. Л. Мончаківський, та В. В. Токарев, “Модель реформування управління залізничним транспортом та її вплив на ЗС України”, *Збірник наукових праць ЦНДІ ОВТ ЗС України*, Вип. 11, с. 209, 2002.
- [3] М. М. Сендецький, “Оптимізація моделі транспортної системи України у воєнний час”, *Збірник наукових праць ЦНДІ ОВТ ЗС України*, № 10, 160-170, 2008.
- [4] М. М. Сендецький, та І. І. Людчик, “Методичні основи обґрунтування організаційно-штатної структури військових частин транспортних військ до застосування в сучасному збройному конфлікті”, *Збірник наукових праць ЦНДІ ОВТ ЗС України*, №3, с. 135-142, 2012.

УДК 621.317

**КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗА ФОРМОЮ УНІФІКОВАНОГО ВІДГУКУ**

*Туз Ю. М., Шумков Ю. С.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [tuz@aer.kpi.ua](mailto:tuz@aer.kpi.ua), [yu.shumkov@gmail.com](mailto:yu.shumkov@gmail.com)*

Задача неруйнівного контролю складних електричних кіл традиційно зводиться до послідовного контролю параметрів окремих ділянок схеми у вигляді простих електричних двополюсників (ДП) [1]. Ці ділянки послідовно підключаються до схеми перетворювача «імітанс-напруга», який здійснює спеціальний електричний режим на полюсах, при якому струм через ДП або напруга на ДП визначається тільки параметрами самого ДП, який контролюється. Найчастіше ці ділянки є багатоелементними  $R, L, C$ -двополюсниками. Під час контролю номінальні значення параметрів елементів заздалегідь відомі. За формою відгуку перетворювача можна контролювати як відхилення параметрів окремих елементів від номінальних, так і контролювати багатоелементні  $R, L, C$ -двополюсники ціликом. Тобто форма відгуку на випробувальний сигнал (ВС) спеціальної форми може бути використана як «узагальнений» інформативний параметр багатоелементних ДП. Якщо відхилення форми відгуку від номінального обумовлено лише допусками на параметри елементів в складі виділеного ДП, тобто відхилення у якості «узагальненого» параметру знаходиться в межах допуску, то немає потреби за відгуком оцінювати значення окремих його параметрів, що спрощує контроль багатоелементних ДП. При цьому перевагу мають методи, що забезпечують вихідні сигнали, які є уніфікованими за формою та зручні для контролю. Лише при необхідності діагностики вимірюються окремі  $R, L, C$ -параметри. Наприклад за методом нулів і полюсів використовують експоненціальні ВС, які відтворюють інверсну модель функції імітансу ДП таким чином, що нулі і

полюси ВС компенсують полюси і нулі функції імітансу ДП. Нульовий полюс забезпечує номінальний відгук у вигляді одиничної ступінчастої функції у часовій області.

Розглянемо приклад контролю параметрів трьохелементного паралельного  $R, L, C$  -двополюсника (рис. 1). Схема включення ДП в схему перетворювача «імітанс-напруга» забезпечує режим заданої напруги на полюсах, при цьому виключено вплив інших шунтуючих опорів. Струм через  $Y_x(s)$  ДП визначається тільки параметрами самого ДП та перетворюється у напругу  $U_{вих}(t)$ . Приклад синтезу ВС  $U_{B0}(t)$ , щоб отримати номінальний відгук у вигляді ступінчастої функції струму  $\bar{i}_\Sigma(t) = 1(t)$  через ДП, наведено у табл. 1.

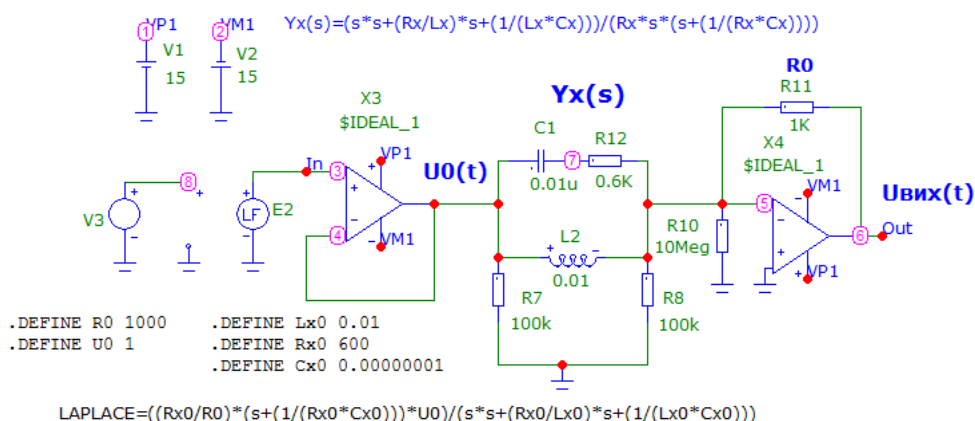


Рис. 1. Включення паралельного  $R, L, C$  -двополюсника у схему вимірального перетворювача «імітанс-напруга»

Таблиця 1

$Y_X(s) = \frac{s^2 + \frac{R_X}{L_X}s + \frac{1}{L_X C_X}}{R_X s(s + \frac{1}{R_X C_X})}$ <p>Умова синтезу ВС</p> $U_{B0}(s) \cdot Y_{X0}(s) = \frac{1}{s} \times I_0$ <p>Операторне зображення ВС</p> $U_{B0}(s) = \frac{R_{X0}(s + \frac{1}{R_{X0} C_{X0}}) \times I_0}{s^2 + \frac{R_{X0}}{L_{X0}}s + \frac{1}{L_{X0} C_{X0}}}$	<p>Якщо <math>R_{X0}^2 C_{X0} &lt; 4L_{X0}</math></p> <p>Випробувальний сигнал ВС</p> $U_{B0}(t) = -R_{X0} M_0 e^{-\gamma_0 t} \sin(\lambda_0 t - \Theta) \times I_0, t \geq 0;$ $M_0 = \frac{1}{\lambda_0} \sqrt{\lambda_0^2 + (\gamma_0 - b_0)^2}; I_0 = \frac{U_0}{R_0};$ $\lambda_0 = \frac{1}{2L_{X0}} \sqrt{4L_{X0} - \frac{R_{X0}^2 C_{X0}}{C_{X0}}}; \gamma_0 = \frac{R_{X0}}{2L_{X0}};$ $\Theta = \arctg \frac{\lambda_0}{\gamma_0 - b_0}; b_0 = \frac{1}{C_{X0} R_{X0}}; R_{X0}^2 C_{X0} < 4L_{X0}$
---	---



Якщо  $R_X = R_{X0}$ ;  $L_X = L_{X0}$ ;  $C_X = C_{X0}$ , то вихідна напруга перетворювача «імітанс-напруга» дорівнює  $U_{B0}(s) \cdot Y_{X0}(s) \cdot R_0 = \frac{1}{s} \times U_0$ .

Припустимо, що резистор  $R_X$  отримав якийсь дефект під час збірки електронної схеми, його значення відмінне від номінального (рис. 2).

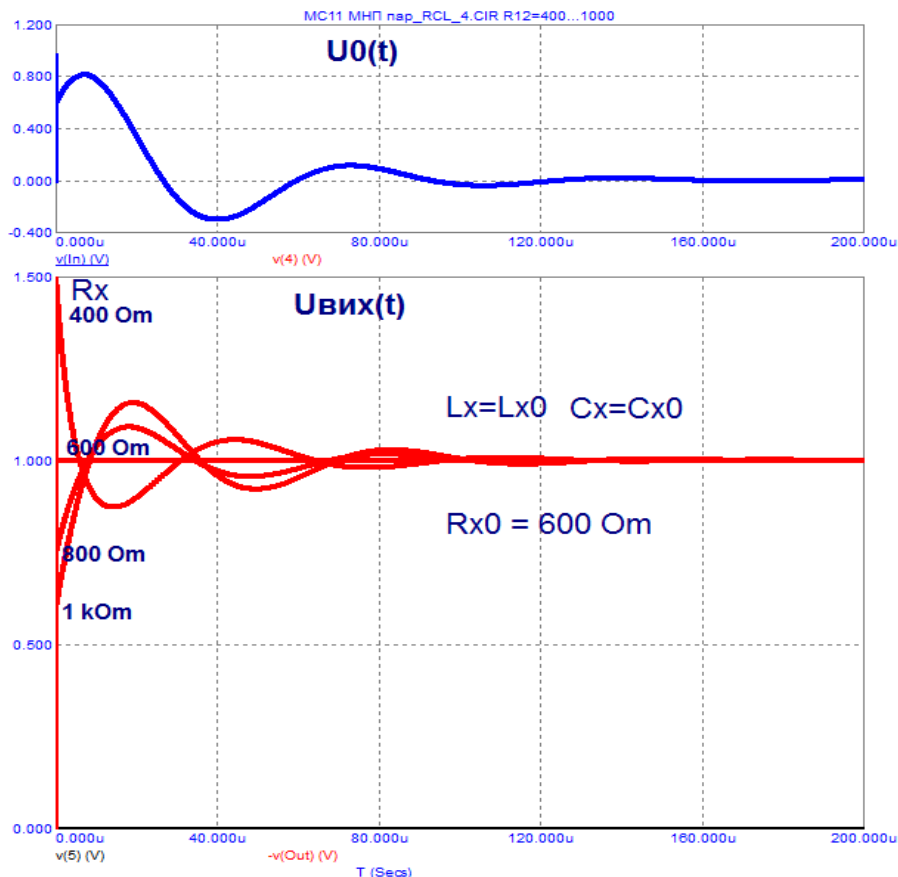


Рис. 2. Уніфікований відгук паралельного  $R, L, C$  - двополюсника, якщо  $L_X = 0.01\text{H}$ ;  $C_X = 0.01\mu\text{F}$ ;  $R_X \in [400\text{Om}; 1000\text{Om}]$  – змінюється з кроком  $\Delta R_X = 200\text{Om}$

Як бачимо, за формою відгуку можливо проконтролювати складний  $R, L, C$  - ДП цілком. На початку перехідного процесу можливо інваріантне визначення  $R_X$ . Аналогічно, у кінці перехідного процесу – інваріантне визначення  $L_X$ .

Розглянуто умови синтезу експоненціальних ВС, тривалість ВС від діапазону визначення параметрів. Отримана система експоненціальних ВС для контролю послідовних та паралельних двох- та трьох елементних  $R, L, C$  - двополюсників. Отримано оцінки похибки визначення параметрів при синтезі ВС на основі кусково-ступінчастих і кусково-лінійних функцій.

*Ключові слова:* багатоелементне двополюсне електричне коло, випробувальний сигнал спеціальної форми.

**Література**

- [1] Н. П. Байда, И. В. Кузьмин, и В. Т. Шпилевой, *Микропроцессорные системы поэлементного диагностирования РЭА*. Москва, СССР: Радио и Связь, 1987.
- [2] Ю. М. Туз, и В. П. Осадченко, «Некоторые особенности контроля параметров электрических цепей по методу нулей и полюсов», в *материалах Респ. науч.-техн. конф. Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем*, Киев, 1985, с. 127-128.

УДК 621.317

## СПОСІБ ПОБУДОВИ СПЛАЙНОВОЇ МОДЕЛІ ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНИХ ВИПРОБУВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ

Туз Ю. М., Шумков Ю. С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: [tuz@aer.kpi.ua](mailto:tuz@aer.kpi.ua), [yu.shumkov@gmail.com](mailto:yu.shumkov@gmail.com)

Необхідність отримання експоненціальних випробувальних сигналів (ВС) різного виду, які складаються з сум експонент, що відтворюють інверсну модель функції імітансу кола, яке досліджується, та з різними за значеннями параметрами, потребує формування сигналів за методом дискретного синтезу [1].

Використання традиційного підходу до формування ВС малої тривалості за допомогою ЦАП, тобто кусково-ступінчастими функціями, за невеликої кількості ділянок апроксимації призводить до значної похибки вимірювання. Аналогова фільтрація сигналу ЦАП приводить до апроксимації гладкими кусково-експоненціальними функціями. Для синтезу таких сигналів доцільним є метод наближення експоненціальними сплайнами, які є подібними на кожній ділянці до моделі ВС, який формується [2].

Наприклад, імпеданс послідовного  $R, C$ -кола  $Z_X(s) = R_X \frac{s + \alpha_X}{s}$ , де  $\alpha_X = 1/R_X C_X$  – параметр кола. ВС має бути  $i_{B0}(t) = (U_0/R_{X0}) \cdot \exp(-\beta_{B0}t) \cdot 1(t)$ , де  $\beta_{B0} = 1/R_{X0} C_{X0}$  – параметр моделі ВС. Тоді відгук  $U_{вих}(t) \cong 1 \cdot U_0 + \frac{\Delta R_X}{R_{X0}} e^{-\beta_{B0}t} U_0 - \frac{\Delta C_X}{C_{X0}} (1 - e^{-\beta_{B0}t}) \cdot U_0$ ,  $t \geq 0$  на виході перетворювача «імітанс-напруга», відтворює  $\Delta R_X, \Delta C_X$  – відхилення параметрів  $R_X, C_X$  від номінальних. За відхиленням відгуку від постійного рівня вихідної напруги  $1 \cdot U_0$  досить легко проконтролювати  $R_X, C_X$ .

При обмеженій кількості ділянок апроксимації  $N_a$  складова похибки визначення параметрів  $R_X, C_X$  через метод наближення є головною.

Якщо ВС сформований математично подібними  $G_{2,1}(\bar{t})$ -сплайнами шляхом інтерполяції за формою ідеального ВС, вихідна напруга перетворювача має бути:

$$U_{\text{вих}}(\bar{t}) = \frac{R_X U_0}{R_{X0}} \left\{ \frac{\alpha_X}{\alpha_G} + \frac{\alpha_X (e^{-\beta_{B0}} - e^{-\alpha_G})}{(1 - e^{-\alpha_G})(1 - e^{-\beta_{B0}})} + \right. \\ \left. + \left[ \left(1 - \frac{\alpha_X}{\alpha_G}\right) \cdot \frac{e^{-\beta_{B0}} - e^{-\alpha_G}}{(1 - e^{-\alpha_G})} - \frac{\alpha_X (e^{-\beta_{B0}} - e^{-\alpha_G})}{(1 - e^{-\alpha_G})(1 - e^{-\beta_{B0}})} \right] \cdot e^{-\beta_{B0} \cdot n} + \right. \\ \left. + \frac{\alpha_X (e^{-\beta_{B0}} - e^{-\alpha_G})}{(1 - e^{-\alpha_G})} e^{-\beta_{B0} \cdot n} \cdot \varepsilon + \left(1 - \frac{\alpha_X}{\alpha_G}\right) \cdot \frac{1 - e^{-\beta_{B0}}}{(1 - e^{-\alpha_G})} e^{-\beta_{B0} \cdot n} e^{-\alpha_G \cdot \varepsilon} \right\}, \quad (1)$$

де  $\bar{t} = n + \varepsilon$  – відносний час,  $\bar{t} = t/h$ ,  $h$  – рівномірний інтервал дискретизації;  $n = 0, 1, 2, \dots, N_a - 1$ ;  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ;  $\alpha_X = \alpha_{X_T} h$ ,  $\beta_{B0} = \beta_{B0_T} h$  – параметри моделі кола і ВС у відносному масштабі; при цьому задаємо  $\beta_{B0} = \alpha_{X0}$ ;  $\alpha_G = \alpha_{G_T} h$  – відносний у часі параметр моделі математично подібного сплайну  $G_{2,1}(\bar{t})$ ;  $h = \Theta_Z / N_a = \left| \ln \xi_{f_{\text{експ. BC}}} \right| / \beta_{B0_T} N_a$ ;  $\Theta_Z$  – час спостереження відгуку;  $N_a$  – кількість ділянок апроксимації;  $\xi_{f_Z}$  – відносна похибка встановлення власної реакції кола. Похибки визначення  $R_X$ ,  $C_X$  через метод наближення знаходять на початку та наприкінці перехідного процесу наступним чином:

$$\delta R_X \cong \Delta U_R / U_{R0}, \text{ де } \Delta U_R = \max_{\varepsilon \in [0,1]} |U_{\text{вих}}[0, \varepsilon] - 1|, U_{R0} \equiv 1, 0.$$

$$\delta C_X \cong \Delta U_C / U_{C0}, \text{ де } \Delta U_C = \max_{\varepsilon \in [0,1]} |U_{\text{вих}}[N_a - 1, \varepsilon] - 1|, U_{C0} \equiv 1, 0.$$

Розглянемо наближення ідеального ВС (за номінальних значень параметрів  $R_{X0}$ ,  $C_{X0}$ ) з мінімальною абсолютною похибкою на кожному інтервалі. У технічних додатках задача рівномірного наближення часто вирішується як близьке до найліпшого. Для кожної ділянки функції є строго опуклими (або увігнутими). У цьому випадку на кожній ділянці похибка всередині інтервалу один раз змінює свій знак і має протилежні їй за знаком і рівні за модулем значення на кінцях інтервалу. Тобто можливо наближення, якісно подібне до Чебишевського (найліпше рівномірне наближення). Отже, на кожній ділянці розбивки моделі ВС  $S_0[n, \varepsilon]$  шукають значення експоненціальної сплайн-функції  $sf_{G_{2,1}}[n, \varepsilon]$  у вузлах  $\{f_n\}_{n=0}^{N_a-1}$ , за яких похибка за модулем дорівнює похибці всередині інтервалу. За умови  $\alpha_G > \beta_{B0}$  сукупність значень для сплайнової моделі у вузлах  $\{f_n\}_{n=0}^{N_a}$  може бути отримана в результаті розв’язку системи:

$$S_0[n, \varepsilon]_{/\varepsilon=0} - sf_G[n, \varepsilon]_{/\varepsilon=0} = -\Delta_n; \quad S_0[n, \varepsilon]_{/\varepsilon=\varepsilon_m} - sf_G[n, \varepsilon]_{/\varepsilon=\varepsilon_m} = +\Delta_{n+1};$$

$$S_0[n, \varepsilon]_{/\varepsilon=1} - sf_G[n, \varepsilon]_{/\varepsilon=1} = -\Delta_{n+1}; \quad \frac{d}{d\varepsilon} \{S_0[n, \varepsilon] - sf_G[n, \varepsilon]\}_{/\varepsilon=\varepsilon_m} = 0, \quad n = \overline{0, N_a - 1}.$$

Система при підстановці в неї виразів  $sf_{G2,1}(\bar{t})$  і моделі ідеального ВС  $S_0(\bar{t}) = e^{-\beta_{B0}\bar{t}}$  перетворюється у систему

$$e^{-\beta_0(n+\varepsilon_m)} - \left[ e^{-\beta_0(n+1)} + \Delta_{n+1} \right] \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_G \varepsilon_m}}{(1 - e^{-\alpha_G})} - (e^{-\beta_0 \cdot n} + \Delta_n) \cdot \frac{e^{-\alpha_G \varepsilon_m} - e^{-\alpha_G}}{(1 - e^{-\alpha_G})} = \Delta_{n+1};$$

$$\varepsilon_m = -\frac{1}{\beta_0 - \alpha_G} \ln \left[ \frac{\alpha_G}{\beta_0(1 - e^{-\alpha_G})} \cdot \left[ e^{-\beta_0 \cdot n} (1 - e^{-\beta_0}) + \Delta_n - \Delta_{n+1} \right] \right]; \quad n = \overline{0, N_a - 1},$$

де  $\Delta_n$  – похибка на  $n$ -й ділянці. Якщо  $\alpha_G < \beta_{B0}$ , то треба змінити знак для похибки на кожній ділянці наближення.

У початковій точці приймаємо  $\Delta_0 = 0$ ,  $f[0] = 0$  та розраховуємо  $\Delta_1$  за системою. Тоді отримуємо  $f[1] = 1 - e^{-\beta_{B0}} - \Delta_1$ . За значенням похибки  $\Delta_n$  на попередньому відрізку апроксимації знаходимо значення  $\Delta_{n+1}$  на наступному. Тоді отримуємо  $f[n+1] = 1 - e^{-\beta_{B0} \cdot n} - \Delta_{n+1}$  і так робимо для кожного  $n = \overline{0, N_a - 1}$ . В результаті знаходимо усі значення  $\{f_n\}_{n=0}^{N_a-1}$  у вузлах  $sf_{G2,1}[n, \varepsilon]$ . Також знайдемо похибки  $\Delta_n$ ,  $n = \overline{0, N_a - 1}$  на кожній ділянці. Ці значення визначають вхідний дискретний сигнал  $f[n]$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  формуючої системи. Відгук  $U_{ZG}[n, \varepsilon]$  на виході перетворювача «імітанс-напруга» буде

$$U_{ZG}[n, \varepsilon] = \frac{(-)R_X U_0}{R_{X0} \alpha_G (1 - e^{-\alpha_G})} \cdot \left\{ \alpha_G \alpha_X (1 - e^{-\alpha_G}) \sum_{m=0}^{n-1} f[m] + \right.$$

$$+ f[n] \cdot \left[ (\alpha_G - \alpha_X)(e^{-\alpha_G \varepsilon} - e^{-\alpha_G}) + \alpha_G \alpha_X - \alpha_G \alpha_X e^{-\alpha_G} \cdot \varepsilon \right] +$$

$$\left. + f[n+1] \cdot \left[ (\alpha_G - \alpha_X)(1 - e^{-\alpha_G \varepsilon}) + \alpha_G \alpha_X \cdot \varepsilon \right] \right\} +$$

$$+ \frac{R_X U_0}{R_{X0}} \cdot [1 + \alpha_X(n + \varepsilon)], \quad n = \overline{0, N_a - 1}; \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1.$$

Якщо обрати значення  $f[n]$  з умови інтерполяції ідеального ВС  $f_{G21}[n, \varepsilon]_{/\varepsilon=0} = 1 - e^{-\beta_{B0} \cdot n}$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, N_a - 1$ , тобто модель ВС

$$\frac{U_0}{R_{X0}} e^{-\beta_{B0} \cdot n} e^{-\beta_{B0} \cdot \varepsilon} /_{\varepsilon=0} = \frac{U_0}{R_{X0}} [1 - sf_{G21}[n, \varepsilon]]_{/\varepsilon=0},$$

отримаємо  $f[m] = 1 - e^{-\beta_{B0} \cdot m}$ . У цьому випадку маємо  $\sum_{m=0}^{n-1} f[m] = n - \frac{1 - e^{-\beta_{B0} n}}{1 - e^{-\beta_{B0}}}$  та з (2) отримаємо вираз (1) для  $U_{ZG}[n, \varepsilon]$  такий самий, як під час інтерполяції за формою ідеального ВС.

*Ключові слова:* випробувальний сигнал спеціальної форми, дискретний синтез, апроксимація.

**Література**

- [1] Ю. М. Туз, та Ю. С. Шумков, “Вимірювання та контроль параметрів складних електричних кіл за методом нулів і полюсів”, на *XIX Міжнар. наук.-тех. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2020, с. 178-179.
- [2] Yu. Shumkov, “Exponential splines in electric circuits’ parameters measuring”, in *Proc. of the International Conf. Actual problems of Measuring Technique "Measurement-98"*, Kyiv, 1998., pp. 250-253.