

**І.Б. ЧЕПКОВ**

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *chepkov@gmail.com*.

**І.В. БОРОХВОСТОВ**

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *borohvostov@icloud.com*.

**В.С. КОМАРОВ**

Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна, e-mail: *komarvlad@ukr.net*.

**М.П. СЕНЬ**

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: *M.Sen@mil.ua*.

**ТОПОЛОГІЯ ТА МЕТРИКА ПРОСТОРУ ХАРАКТЕРИСТИК  
СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ У КОНТЕКСТІ ЗВ'ЯЗАНОЇ  
ЛАГРАНЖЕВО-ЕЙЛЕРОВОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ЇХНЬОГО РОЗВИТКУ**

**Анотація.** У статті закладено топологічний і метричний фундамент математично строгої формалізації зв'язаної Лагранжево-Ейлерової моделі динаміки розвитку складних технічних систем. Простір характеристик складних технічних систем визначено як компактний топологічний многовид з краєм, вкладений у скінченновимірний Евклідовий простір із системою нелінійних обмежень, що включає ресурсні обмеження зверху для кожної характеристики; за умови регулярності обмежень (LICQ) у точках краю простір є топологічним многовидом із краєм. Для ймовірнісно-функціональних складних технічних систем обґрунтовано канонічний вибір метрики Фішера–Рао на основі теореми єдиності Ченцова; для детермінованих систем розглянуто зважену Евклідову метрику. Введено мінімальний набір диференціально-геометричних об'єктів (дотичний простір, Ріманову норму швидкості, Ріманів градієнт функції ефективності) та на їхній основі отримано точне математичне визначення матеріальної похідної як ключового оператора зв'язаної Лагранжево-Ейлерової моделі. Ця стаття є першою в серії з чотирьох робіт з математичної теорії еволюції складних технічних систем.

**Ключові слова:** складні технічні системи, простір характеристик, Ріманів многовид, метрика Фішера–Рао, матеріальна похідна, зв'язана Лагранжево–Ейлерова модель.

DOI 10.34229/KCA2522-9664.26.5.8

**ВСТУП**

Класична теорія ефективності технічних систем спирається на два припущення — стаціонарність середовища функціонування та незалежність еволюції характеристик окремого зразка від еволюції інших зразків того самого класу. Для широкого класу сучасних технічних систем (безпілотних робототехнічних комплексів, систем кібербезпеки, телекомунікаційних мереж, енергетичних комплексів) обидва припущення порушено одночасно: характеристики цих систем (далі — складних технічних систем, СТС) еволюціонують одночасно та у взаємозалежний спосіб, причому еволюція зразка відбувається синхронно з адаптивною зміною самого середовища функціонування. Характерним прикладом є безпілотні комплекси у взаємодії із засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ), які формують у термінах механіки суцільних середовищ в'язке Ейлерове поле — розподілений опір, що адаптивно реагує на «потік» зразків СТС відповідного класу.

Концептуальні основи такого опису запропоновано в роботі [1] як зв'язану Лагранжево-Ейлерову модель (далі — ЗЛЕ-модель), що адаптує апарат механіки суцільних середовищ [2, 3] до взаємодії СТС з адаптивним середовищем. Водночас ключові поняття ЗЛЕ-моделі — простір характеристик, швидкість