

**Г. В. КОЗЕРАЦЬКИЙ, В. П. ЯГЛІНСЬКИЙ, А. Б. ХІХЛОВСЬКИЙ, О. Т. ОЗЕРНЮК**

### **КВАЛІМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ТРЕНАЖЕРА-ГЕКСАПОДА**

Виконано аналіз існуючих методів удосконалення конструкцій технічних об'єктів і оптимізації їх критеріальних параметрів під час відпрацювання заданих функціональних траєкторій. Запропоновано групові комплексні показники таких функціональних властивостей тренажера-гексапода: енергоефективності, точності позиціонування, маневреності, швидкодії та надійності. Розроблено відповідну кваліметричну модель технічного рівня тренажера, яка складає п'ять рівнів моделювання глибини декомпозиції якості (внутрішня альтитуда) і п'ять надрівнів висоти зовнішньої структури якості (зовнішня альтитуда). Удосконалено математичну модель технічного рівня тренажера, яка ґрунтується на п'ятнадцяти комплексних критеріях, відображаючих функціональні властивості. Інтегральний показник технічного рівня і вагові коефіцієнти комплексних функціональних властивостей визначено рішенням системи шести алгебраїчних рівнянь матриці якості, а не призначено експертами. Продемонстровано визначення резервів підвищення технічного рівня тренажера шляхом побудови матриці якості і відповідної паутини якості.

**Ключові слова:** робоча зона, сингулярність, коефіцієнт готовності, повнопілотажний симулятор.

**Г. В. КОЗЕРАЦЬКИЙ, В. П. ЯГЛІНСЬКИЙ, А. Б. ХІХЛОВСЬКИЙ, О. Т. ОЗЕРНЮК**

### **КВАЛІМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ТРЕНАЖЕРА-ГЕКСАПОДА**

Выполнен анализ существующих методов совершенствования конструкций технических объектов и оптимизации их критериальных параметров при отработке заданных функциональных траекторий. Предложено групповые комплексные показатели таких функциональных свойств тренажера-гексапода: энергоэффективности, точности позиционирования, маневренности, быстродействия и надежности. Разработана соответствующая кваліметрическая модель технического уровня тренажера, которая составляет пять уровней моделирования глубины декомпозиции качества (внутренняя альтитуда) и пять надуровней высоты внешней структуры качества (внешняя альтитуда). Усовершенствована математическая модель технического уровня тренажера, которая основывается на пятнадцати комплексных критериях, отображающих функциональные свойства. Интегральный показатель технического уровня и весовые коэффициенты комплексных функциональных свойств определен решением системы шести алгебраических уравнений матрицы качества, а не назначен экспертами. Продемонстрировано определение резервов повышения технического уровня тренажера путем построения матрицы качества и соответствующей паутины качества.

**Ключевые слова:** рабочая зона, сингулярность, коэффициент готовности, полнопилотажный симулятор.

**G. V. KOZERATSKY, V. P. YAGLINSKY, A. B. KHIKHOVSKY, O. T. OZERNIUK**

### **QUALIMETRIC MODEL OF TECHNICAL LEVEL OF THE SIMULATOR-HEXAPODE**

The analysis of existing methods for improving the design of technical objects and optimizing their criterial parameters for the development of specified functional trajectories is performed. The group complex indicators of such functional properties of the hexapod simulator are proposed: energy efficiency, positioning accuracy, maneuverability, speed and reliability. The corresponding qualitative model of the technical level of the simulator is developed, which consists of five levels of modeling the depth of decomposition of quality (internal altitude) and five levels above the external quality structure (external altitude). The mathematical model of the technical level of the simulator has been presented with a mathematical model, which is grounded on the complex criteria, which show the functional properties. The integral indicator of the technical level and weight coefficients are determined from the solution of six matrix equations, and not are appointed by experts. Determination of reserves for increasing the technical level of the simulator is demonstrated by constructing a matrix of quality and the corresponding web of quality.

**Keywords:** working area, singularity, readiness factor, full flight simulator.

**Вступ.** Створення нової техніки і своєчасна модернізація вже освоєних моделей є фундаментом безперервного розвитку суспільного виробництва. Проблема забезпечення якості наукоємних виробів в процесі науково-технічного прогресу не спрощується, а значно ускладнюється. Отже вирішувати її традиційними методами, тобто лише шляхом контролю якості готової продукції, практично неможливо. Дослідження конкурентоздатності серійних моделей тренажерної техніки на основі механізмів паралельної структури і кінематики (МПСК) в умовах ринкової економіки є однією з умов успішного функціонування відповідних виробничих підприємств. Розв'язання проблеми всебічної підготовки екіпажів мобільних машин (ММ) до дії в екстремальних ситуаціях, створення і удосконалення систем імітації рухів бойових машин піхоти (БМП) і авіатренажерів, а також забезпечення ефективності виробництва тренажерів досягається шляхом прогнозування технічного рівня аналогічних конструкцій МПСК та відбором кращих варіантів, починаючи зі стадії допроектних досліджень, є актуальною сучасною проблемою [1–3].

**Постановка проблеми і мета дослідження.** Вимоги споживачів щодо покращання техніко-економічних

показників промислових роботів (ПР) і промислових платформ (ПП) при зменшенні їх габаритів, маси та енергоємності ґрунтується на одночасному збільшенні швидкостей та пришвидшень, що призводить до значного підвищення навантаження на ланки та кінематичні пари, зростання амплітуд вимушених коливань ланок при певних режимах експлуатації.

Вибір оптимального за певними критеріями якості режиму функціонування конкретних моделей ПР і ПП є важливою умовою забезпечення їх подовженого життєвого циклу. Під час вибору та при розробці конкретної моделі насамперед аналізується структура і параметри її складових частин: привода, виконавчої механічної системи, системи управління, типових об'єктів маніпулювання. Слід враховувати також характеристики зовнішньої силової взаємодії, перешкоди переміщенням, складність та інтенсивність функціонально-технологічних режимів роботи [4, 5].

Метою роботи є вибір оптимального варіанту, його використання і модернізація за комплексними показниками функціональних можливостей, надійності, енергозбереження тощо. Задача уявляється актуальною і складною науковою проблемою, яка потребує не тільки об'єктивного, багаторівневого і всебічного відобра-

ження службових властивостей основних складових конструкцій тренажера, але й розробки універсальних методів математичного та комп'ютерного дослідження і оптимізації службових властивостей значної множини аналогічних об'єктів модульної побудови.

**Аналіз відомих досліджень технічного рівня тренажерних систем.** Метод оцінки якості маніпуляторів ПР послідовної структури у складі автоматичного устаткування для металообробного, зварювального, ливарного та ін. виробництв, розроблений професором Є. Г. Нахапетяном, використовує кваліметричні таблиці рівнів показників якості та вхідні емпіричні функції у часі кінематичних, силових, динамічних та ін. параметрів механізму, на основі яких сформовано низку одиничних (перший рівень) та комплексних (другий, третій та четвертий рівні) показників якості [6, 7]. До найбільш важливих віднесено оцінки ПР за показниками точності та тривалості позиціонування. У якості одиничних показників технічного рівня ПР запропоновано наступні: час руху  $t_{\Pi}$  без урахування коливань; час руху  $T_{\Pi}$  з урахуванням коливань в кінці руху (у точці позиціонування); час розгону  $t_p$  і гальмування  $t_g$  вихідних ланок механізму; маса ПР  $m_p$  і маса об'єкта маніпуляції  $m_M$ ; шлях, пройдений полюсом схопу  $L_C$ ; моменти інерції вихідних ланок  $J_k$ ; точність або повторність позиціонування  $\Delta_C$  (полюса схопу) і  $\Delta_{\phi}$  (кутова для ланок робота); максимальні лінійні пришвидшення під час розгону  $a_{\max}^{(p)}$  і гальмування  $a_{\max}^{(g)}$ ; статичні навантаження, прикладені до вихідних ланок  $P_{CT}$ ,  $M_{CT}$ ; перепади тисків  $\Delta p_{\max}$ , моменти  $M_{\max}$  і потужності  $N_{\max}$  приводу; середні швидкості лінійних  $V_{cp}$  і кутових  $\omega_{cp}$  переміщень за ступенями рухомості.

Для тих випадків використання ПР, коли на дільницях руху виконуються технологічні операції з вимогами рівномірності руху, до виробничих одиничних показників якості віднесено коефіцієнти нерівномірності лінійного  $\delta_v$  та кутового  $\delta_{\omega}$  переміщень. Для визначення одиничних показників використовують вхідні залежності кінематичних та динамічних параметрів ПР від часу, які визначають експериментально чи за допомогою відповідних розрахункових моделей [6, 7].

На основі об'єднання одиничних показників технічного рівня (перший кваліметричний рівень) з використанням загальної методики кваліметрії механізмів у роботах проф. Є. Г. Нахапетяна сформовано групові показники якості 2-го, 3-го і 4-го рівнів та складено відповідні таблиці. При цьому групові показники визначають шляхом інтегрування вхідних залежностей, а також за допомогою емпіричних залежностей, визначених методами теорії подоби і прийнятих для порівняння. До групових показників 2-го рівня віднесено: усереднений час транспортування  $t_{cp}$ , усереднену швидкість транспортування об'єкта маніпуляції  $V_{cp,0}$ , максимальну силу інерції маси об'єкта маніпуляції  $P_{in,max}^{(p)}$  під час розгону двигунів, відносні коефіцієнти часу розгону  $\eta_p$  та гальмування  $\eta_g$ , емпіричний коефіцієнт  $A_{cp}$ :

$$t_{cp} = T_{\Pi} - t_{\Pi}; \quad V_{cp,0} = L_C / t_{\Pi}; \quad (1)$$

$$P_{in,max}^{(p)} = m_M a_{\max}^{(p)}; \quad A_{cp} = P_{CT} L_C.$$

$$\eta_g = t_r / t_g; \quad \eta_p = t_p / t_{\Pi}. \quad (2)$$

Наступні показники 3-го рівня запропоновані авторами на основі математичного моделювання, теорії подоби й відповідних алгебраїчних перетворень

$$K_0 = \omega_{cp,0} \sqrt[3]{J_k}; \quad K_{Ld} = a_{\max}^{(p)} / V_{cp}^2; \quad (3)$$

$$K_{d\omega} = \omega_{\max}^{(p)} / \omega_{cp}^2.$$

Показники 4-го і 5-го рівнів об'єднують показники нижчих рівнів і вважаються комплексними, наприклад,

$$a_v = K_L / (\sqrt{L} \sqrt[4]{\Delta_C}), \quad A_d = K_{d\omega} \delta_{\omega} \sqrt[3]{J}, \quad (4)$$

$$A_k = a_{\omega} / A_d, \quad A_{kd} = \sqrt[5]{a_{\omega}} / A_d.$$

Розглянуті вище показники якості в цілому не відображають технічний рівень продукції і тому можуть використовуватись як складові одиниці кваліметричної моделі. Показники (4) не мають вираженого фізичного змісту. Запропонована методика оцінки якості ПР, яку опрацьовано тільки на рівні механізмів і модулів, не є універсальною, оскільки не забезпечує можливість оцінювання ПР у цілому, зокрема на етапі проектних досліджень, а також не відображує принципові відмінності проектування та експлуатації конструкцій ПП на основі МПСК.

Характерними обмеженнями, що стримують широке впровадження запропонованих методів в інженерну практику, є недостатні обсяги статистичних даних, неконтрольованість точності рішень, що базуються на експертній інформації, відсутність єдиного універсального підходу до побудови математичних моделей, що відображують послідовно-ітераційний процес проектування багато-компонентних виробів системної складності [8].

У роботах [8–10], присвячених дослідженню технічного рівня продукції машинобудування, вперше науково обгрунтовано адекватність моделювання множини показників якості  $\{Q\} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  і відношень між ними  $\{q_i \leftrightarrow q_j\}$ ,  $i, j = 1, n$  як єдиної інформаційної системи, подальший розвиток якої базується на *принципі функціонально-кібернетичної еквівалентності*, згідно з яким чим більше число  $n$ , тим більше альтитуда моделі, з поглибленням якої вужчає множина відношень  $\{q_i \leftrightarrow q_j\}$ .

Для даної композиції відношень найбільш адекватною є структура у вигляді багаторівневої оболонки, яка відрізняється тим, що показники кожного рівня не зводяться до сукупності показників інших рівнів. На кожному рівні такої універсальної моделі, що не потребує застосування суб'єктивних експертних методів, можна враховувати нові службові властивості, які притаманні системі в цілому, а також реалізовувати аналіз аналогів та відбір варіантів за єдиним системним критерієм  $U(Q)$  технічного рівня [9]. Оцінка  $U(Q)$  технічного рівня ПР чи ПП не може бути відображена простою сумою оцінок окремих службових властивостей конструкції у вигляді

$$U(Q) = f(q'_1, \dots, q'_i, \dots, q'_n) \neq \sum_{i=1}^n q'_i \quad (5)$$

і потребує відображення системних взаємозв'язків між одиничними й комплексними кваліметричними показниками, що складають підсумкову оцінку ( $q'_i$  і  $Q$  – одиничні показники і вектор одиничних показників службових властивостей).

Збільшення числа параметрів, об'єднаних у комплексні показники, можливо лише шляхом накопичення експериментальних даних та уточнення вхідних емпіричних залежностей. Практична цінність отриманих результатів полягає у тому, що вперше розроблено низку комплексних показників якості для механізмів маніпуляторів ПР та встановлено діапазони відповідних значень.

Є відомою низка методів для прогнозування конкурентоздатності машинобудівної продукції, спільним для яких є етап визначення множини споживчих властивостей з відповідними показниками [11, 12]. Зокрема, обґрунтовано багатокритеріальний апроксимаційний підхід до оцінки конкурентоздатності промислової продукції на етапі проектування, формалізовано метод визначення сукупності верхніх і нижніх рівнів значень показників, що у майбутньому забезпечать конкурентоздатність продукції на основі екстраполяції відповідних значень у минулому.

Для оцінки конкурентоздатності проекту визначається розташування адекватної точки  $y^*$  щодо границь смуги прогнозу, побудованої на основі лінійної екстраполяції апроксимуючої поверхні за даними не менш, ніж для  $(n + m + 1)$  аналогів. Розглянуто алгоритм процедури експертного поліпшення ПР, призначеного для технологічних операцій вертикального складання й оцінюваного за 8-ма показниками якості. Метод опрацьовано на прикладі 27 моделей ПР, призначених для вертикального складання [11]. Основний недолік даного методу – умова взаємної незалежності елементів множини показників  $\{Q\}$ , що практично неможливо забезпечити.

При створенні автоматизованих систем багатокритеріального вибору проектних розв'язків використовують метод аналізу ієрархій [8, 9]. Формування ієрархічних структур зверху-униз (від головної мети вибору до другорядних) визначає ступінь важливості показників нижніх рівнів і дозволяє тільки за критеріями (без виділення можливих альтернативних розв'язків) побудувати модель вибору. При цьому найбільш відповідальним для об'єктивності й однорідності розв'язків є встановлення вектору коефіцієнтів вагомості (пріоритетів) сформованої структури показників, для чого використовують обробку експертної інформації методами парних порівнянь (метод вирішальних матриць), копіювання, стандартів, оцінки нечіткими множинами тощо.

Недоліки розглянутих та ін. аналогічних методів зумовлені трудомісткістю й тривалістю одержання достатньої експертної інформації, а також необхідністю періодичного коректування елементів вектору пріоритетів у застосуванні до множин, що розширюються, показників якості й альтернативних проектів сучасних механізмів і машин.

Аналіз опублікованих даних свідчить, що для багаторівневого відображення службових властивостей тре-

нажерів необхідним є формування такої універсальної структурованої інформаційної бази даних, яка забезпечить об'єктивність кваліметричних оцінок технічного рівня не тільки відповідних підсистем, модулів, вузлів, "слабких елементів", а й конструкції у цілому. Зокрема, для всебічного вивчення множини кінематичних та динамічних параметрів серійних конструкцій тренажерів під час відпрацювання множини функціональних траєкторій необхідно розробити аналітичні моделі, опрацювати алгоритми розрахункових процедур і створити відповідний універсальний комплекс прикладних програм.

**Функціональні властивості авіатренажерів та їх характеристики.** Авіаційний (пілотажний) тренажер – це імітатор польоту, призначений для наземної підготовки пілотів. В авіаційному тренажері імітується динаміка польоту і робота літакових систем і двигунів за допомогою спеціальних моделей, реалізованих в програмному забезпеченні обчислювального комплексу тренажера. Авіаційні тренажери отримали велике поширення і у військовій і в цивільній авіації з двох причин [13, 14]. По-перше, авіаційний тренажер дозволяє зробити підготовку пілотів абсолютно безпечною, тому що підготовка пілотів в реальному польоті завжди пов'язана з підвищеним ризиком. Крім цього, тренажер дозволяє зробити безпечно відпрацювання позаштатних ситуацій, деякі з яких або вкрай небезпечні для відпрацювання в реальному польоті, або взагалі їх відпрацювання в реальному польоті заборонена законодавчо. По-друге, авіаційний тренажер дозволяє заощадити значні фінансові кошти льотної підготовки екіпажів на увазі того, що вартість експлуатації реального літака кратно перевищує вартість експлуатації тренажера (незважаючи на високу вартість сучасних тренажерів, часом перевищує 10 мільйонів доларів).

Особливу цінність авіаційні тренажери представляють у військовій авіації, дозволяють практично без обмежень імітувати реальну бойову обстановку, яку вкрай важко зімітувати в мирний час під час навчань. Зараз можна констатувати, що тренажери цивільних літаків мають більш високий рівень досконалості, ніж військових літаків на увазі дії в цивільній авіації жорстких стандартів *JAR-FSTD* і *ICAO 9625*, які детально визначають відповідність тренажерної моделі реальному літаку [15].

Авіаційні тренажери можна розділити на чотири основні групи: *Flight Training Device (FTD)* – повітряний навчальний пристрій; *Flight Procedures Training Device (FPTD)* – процедурні тренажери, призначені для відпрацювання екіпажем процедур підготовки та виконання польоту; *Full Mission Simulator (FMS)* – групові тренажери об'єднані в єдину мережу для відпрацювання групових бойових дій; *Full Flight Simulator (FFS)* – комплексні повнопілотажні тренажери. У сучасній практиці підготовки пілотів цивільної авіації найбільшого поширення набули *FFS* (рис. 1) і процедурні тренажери *FPTD*.

Визнано, що на якість продукції машинобудування впливає значна кількість чинників, що діють як самостійно, так і у взаємозв'язку між собою, як на окремих етапах життєвого циклу продукції, так і на кількох етапах. Змістовний аналіз понять *якість* і *службова властивість* сучасних технологічних та транспортних машин, зокрема тренажерів, показує, що ці поняття є взаємопов'язаними, отже можуть бути адекватно відображе-

ні виключно системними методами. При цьому будь-яка комплексна оцінка якості реальної чи віртуальної конструкції має відображувати водночас як множину окремих службових властивостей, так і складну системну властивість технічної досконалості виробу в цілому.



Рис. 1 – Комплексний повнопілотажний авіатренажер (FFS)

На основі аналізу висновків експертів щодо діючої тренажерної техніки, документації виробників щодо механічних та мехатронних модулів у складі відповідних механізмів та результатів відомих досліджень аналогічних систем, встановлено номенклатуру показників функціональності типових конструкцій (табл. 1) за наступними функціональними властивостями: енергоефективність, точність позиціонування, маневреність, швидкодія та надійність. Кожну властивість відображують числовим або якісним показником  $Q(Y)$ , що характеризує її інтенсивність за певною шкалою. В результаті конкретний варіант отримує відображення у вигляді множини чисел, матриці чи вектору у багатовимірному просторі показників  $Q^n(Y)$ , що дозволяє формалізувати подальшу технологію оцінювання його технічного рівня та прогнозування конкурентоспроможності.

**Енергоефективність** характеризується груповим критерієм енергоемності

$$\gamma_N = \frac{N_D m_{\Pi}}{m_T n_S N_H}, \quad (6)$$

де  $N_D$ ,  $N_H$  – максимальна споживана і номінальна потужність двигунів приводу;

$m_{\Pi}$ ,  $m_T$  – маси платформи з об'єктом і тренажера;

$n_S$  – число ступенів рухомості тренажера.

**Точність позиціонування** характеризується двома показниками:  $\Delta_C$  – похибка позиціонування полюса ПП тренажера;  $\Delta_{\phi}$  – кутова усереднена динамічна похибка штанг тренажера.

Властивість "**маневреність**" вирізняє трьома комплексними критеріями:

$$\gamma_m = \frac{m_{\Pi}}{m_T n_S} \text{ – відносна навантаженість;}$$

$$\gamma_{RZ} = \frac{V_T \cdot R_B}{V_0 \cdot R_A} \text{ – критерій ефективності робочої зони;}$$

$$\gamma_t = \frac{C_t}{\max C_t} \cdot \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \text{ – критерій сингулярності конфігурації механізму тренажера,}$$

де  $V_0$  і  $V_T$  – повний об'єм робочої зони і при зміні кута тангажу платформи тренажера;

$R_A$ ,  $R_B$  – радіуси розташування шарнірів нерухої бази і рухої платформи гексаподу;

$C_t$ ,  $\max C_t$  – коефіцієнт жорсткості механізму гексаподу у сингулярній конфігурації (за напрямом дотичної до траєкторії тангажа та його максимальне значення);

$L_{\max}$ ,  $L_{\min}$  – максимальна і мінімальна довжини штанг гексапода.

**Швидкодія** тренажера запропоновано характеризувати такими критеріальними показниками:

$$k_{DP} = \max(a_p L_{\max} / V_p^2) \text{ – коефіцієнт динамічності платформи;}$$

$$k_{dA} = \varepsilon_{\max} / \omega_{cp}^2 \text{ – коефіцієнт динамічності штанг;}$$

$$k_{AKC} = \max(a_{CE} / a_B)^2 \text{ – критерій акселераційного навантаження на екіпаж тренажера;}$$

$$k_{TR} = \frac{2\gamma_T \cdot L_{\min}}{\pi \cdot n_{TR} \cdot L_{\max}} \text{ – критерій ефективності траєкторії маневру тренажера,}$$

де  $V_p$ ,  $a_p$  – швидкість і пришвидшення полюса платформи тренажера;

$\omega_{cp}$ ,  $\varepsilon_{\max}$  – усереднені кутові швидкість та пришвидшення штанг гексаподу;

$a_{CE}$ ,  $a_B$  – пришвидшення центра мас водія (екіпажу) тренажера при маневрі і базове пришвидшення;  $\gamma_T$  – кут тангажа;

$n_{TR}$  – коефіцієнт складності траєкторії (для бокового заносу  $n_{TR} = 1,1$ ; тангажа  $n_{TR} = 1,2$ ; подвійного бокового заносу  $n_{TR} = 1,3$ ; одночасного тангажа з боковим заносом  $n_{TR} = 1,4$ ).

Для властивості "**надійність**" конструкцій тренажера встановлено наступні одиничні показники: усереднений ресурс "слабких" елементів  $T_{CE}$ ; усереднений ресурс кінематичних пар  $T_{КП}$ ; усереднений ресурс модулів  $T_{PM}$ ; усереднене значення коефіцієнта готовності для підсистеми  $T_{ГТ}$ ; наробіток на відмову системи  $T_{НС}$ .

**Побудова кваліметричної моделі тренажера-гексапода.** Керування якістю на стадії вибору концепції націлене на одержання оптимальної структури технічної системи тренажера, при цьому уточнюють *технічне завдання*, погоджуючи із замовником номенклатуру критеріїв якості.

На основі аналізу та статистичного усереднення параметрів ПП на основі гексаподу у складі тренажера та розрахункових значень їх функціональних показників, визначено межі зміни відповідних показників технічного рівня, виконано нормування відповідних показників згідно з (7) і (8), сформовано номенклатуру типових показників (табл. 1) та побудовано кваліметричну модель тренажера (рис. 2). Труднощі оптимізації складних технічних систем полягають у необхідності враховувати потужну множину стохастичних та функціональних взаємозв'язків параметрів.

Таблиця 1 – Систематизація номенклатури типових показників якості тренажера на основі МПСК типу гексапод

| Властивість                | Показник якості  | Діапазон визначення | Розрахункове значення | Нормоване значення показника |
|----------------------------|--|---------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1. Енергоефективність      | 1.1. $\gamma_N = \frac{N_D m_{\Pi}}{m_T n_S N_H}$                                | 0,10...20,0         | 8,5                   | 0,72                         |
| 2. Точність позиціонування | 2.1. $\Delta_C$ , мм   | 0,06...1,40         | 0,2                   | 0,79                         |
|                            | 2.2. $\Delta_d$ , рад  | 0,005...0,015       | 0,006                 | 0,87                         |
| 3. Маневреність            | 3.1. $\gamma_m = m_{\Pi} / (m_T n_S)$  | 0,1...1,5           | 1,3                   | 0,77                         |
|                            | 3.2. $\gamma_{RZ} = \frac{V_T \cdot R_B}{V_0 \cdot R_A}$                         | 0,15...1,8          | 1,1                   | 0,82                         |
|                            | 3.3. $\gamma_t = \frac{C_t \cdot L_{\min}}{\max C_t \cdot L_{\max}}$             | 0,1...0,9           | 0,4                   | 0,86                         |
| 4. Швидкодія               | 4.1. $k_{DP} = \max(a_p L_{\max} / V_p^2)$                                       | 0,2...1,10          | 0,5                   | 0,42                         |
|                            | 4.2. $k_{dA} = \varepsilon_{\max} / \omega_{cp}^2$                               | 1,1...3,5           | 3,2                   | 0,48                         |
|                            | 4.3. $k_{AKC} = \max(a_{CE} / a_B)^2$  | 0,03...0,15         | 0,06                  | 0,55                         |
|                            | 4.4. $k_{TR} = \frac{2\gamma_T \cdot L_{\min}}{\pi \cdot n_{TR} \cdot L_{\max}}$ | 2,5...10,5          | 3,5                   | 0,73                         |
| 5. Надійність              | 5.1. $T_{HC}$ , год  | 2000...6500         | 5100                  | 0,74                         |
|                            | 5.2., $T_{ГТ}$ , год   | 2100...6600         | 5200                  | 0,84                         |
|                            | 5.3. $T_{PM}$ , год  | 2150...6700         | 5250                  | 0,91                         |
|                            | 5.4. $T_{КП}$ , год  | 2300...6750         | 5300                  | 0,95                         |
|                            | 5.5. $T_{CE}$ , год  | 2400...6800         | 5400                  | 0,96                         |

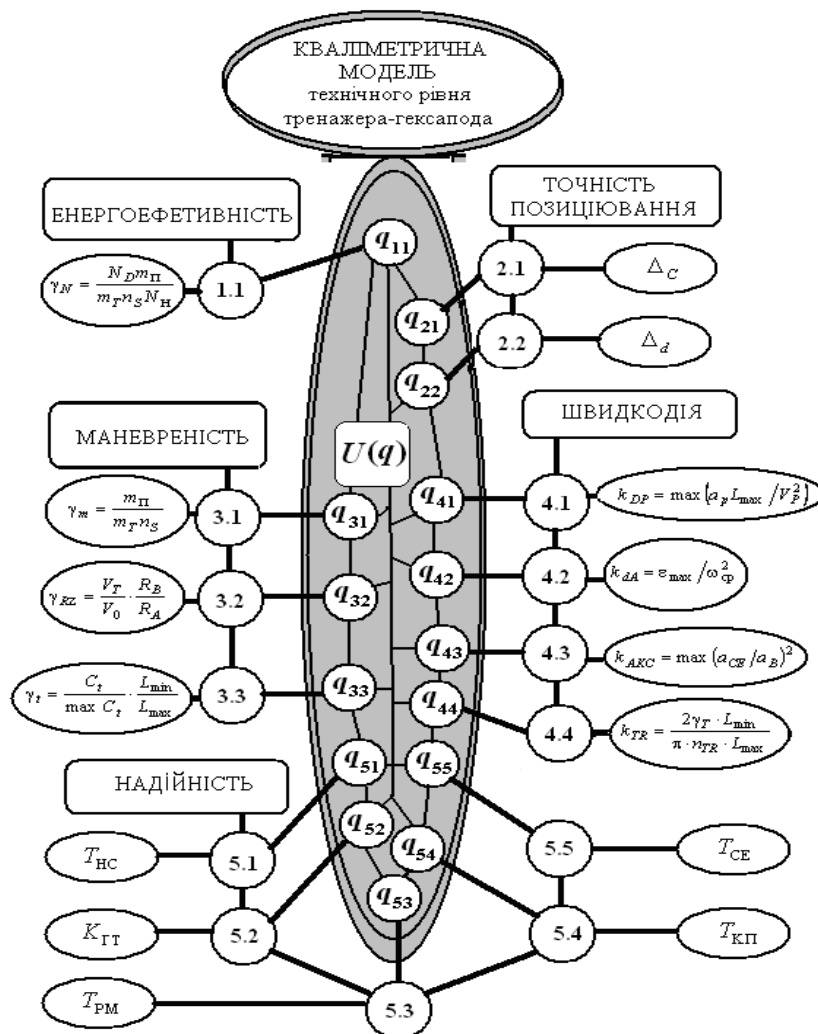


Рис. 2 – Структура системної кваліметричної моделі технічного рівня тренажера-гексапода

Оскільки технічний рівень – поняття відносне, отже відповідний критерій  $U(Q)$  є безрозмірним, а комплексні показники (точності позиціонування, швидкодії, надійності, вантажності тощо), що мають імовірнісну природу, ніколи не перевершують одиницю. На основі гіперболічної функції  $\text{th}y = (e^{2y} - 1)/(e^{2y} + 1)$ , що відображує зниження рівня переваги будь-якої ознаки якості  $y_i \forall i = 1, n$  із зростанням її значення, для нормування різноманітних фізичних шкал елементів множини  $\{Y\}$  у діапазоні  $[0, 1; 1]$  отримано наступні рівняння [9]:

при відображенні без зміни градієнта

$$q_i = 0,1 + 1,18\text{th}[(y_i - y_i^-)/(y_i^+ - y_i^-)]; \quad (7)$$

при зміні градієнта на протилежний

$$q_i = 1 - 1,18\text{th}[(y_i - y_i^-)/(y_i^+ - y_i^-)], \quad (8)$$

де  $y_i^-, y_i^+$  – відповідно нижня і верхня межі статистично усередненого діапазону зміни показника певної ознаки.

Показник технічного рівня  $U(Q) \equiv U$ , значення якого є інваріантним рівню кваліметричної моделі, визначається за рішенням наступної системи неоднорідних лінійних рівнянь [2]:

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} & -1 \\ 0 & q_{22} & q_{23} & q_{24} & q_{25} & -1 \\ 0 & 0 & q_{33} & q_{34} & q_{35} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & q_{45} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5\}$  – стовпець невідомих вагових коефіцієнтів.

На основі кваліметричної моделі технічного рівня (9) визначено групові показники (перша строка таблиці) та побудовано матрицю якості (рис. 3) та відповідну "павутину якості", (рис. 4).

| Енерго-ефективність | Точність позиціонування | Маневреність | Швидкодія | Надійність | Рівень моделі     |
|---------------------|-------------------------|--------------|-----------|------------|-------------------|
| 0,72                | 0,79                    | 0,77         | 0,42      | 0,74       | система тренажера |
|                     | 0,87                    | 0,82         | 0,48      | 0,84       | підсистеми        |
|                     |                         | 0,86         | 0,55      | 0,91       | модулі            |
|                     |                         |              | 0,73      | 0,95       | кінематичні пари  |
|                     |                         |              |           | 0,96       | "слабкі" елементи |

Рис. 3 – Матриця якості авіатренажера АНТК "Антонов"

Системний показник технічного рівня визначено із системи (9):  $U_B = 0,76$ . В результаті проведених досліджень встановлено наявність резервів для подальшого технічного удосконалення конструкції МПСК у складі тренажера-гексапода за властивостями швид-

кодії, надійності та енергоефективності (відповідні значення нормованих показників вирізняє у матриці якості, рис. 3). Після модернізації тренажера одиничні показники властивостей приймають нові значення і встановлюється нове значення інтегрального показника технічного рівня  $U$ , якому відповідають нові матриця якості та павутина якості.

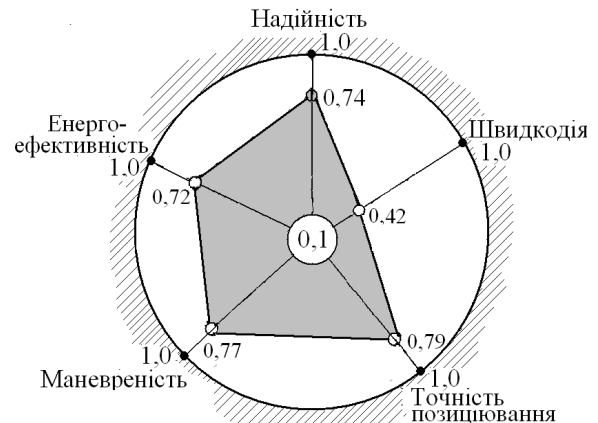


Рис. 4 – Павутина якості тренажера

#### Висновки:

1. Удосконалено метод відображення технічного рівня тренажера модульної побудови, що забезпечує функціонально-структурну цілісність, підвищену об'єктивність відображення і фізичну інформативність показників якості механічних підсистем в єдиному системному базисі внутрішніх (структурних) і зовнішніх (функціональних) службових властивостей.

2. Запропонована кваліметрична модель технічного рівня тренажера на основі розроблених комплексних групових критеріїв якості.

3. На прикладі авіатренажера АНТК "Антонов" продемонстровано визначення інтегрального показника технічного рівня та резервів для його підвищення.

4. Запропонована методика дає змогу оцінити технічний рівень і виявити резерви покращення типових серійних конструкцій тренажерів на основі МПСК під час модернізації або при проектуванні нових моделей, а також порівнювати альтернативні варіанти конструкцій з метою відбору кращої.

#### Список літератури

- Кузнецов Ю. М., Скляр Р. А. *Прогнозування розвитку технічних систем*. Київ: ПП "ЗМОК", 2004. 242 с.
- Кіндрацький Б. Методологія та алгоритм багатокритеріального оптимізаційного синтезу пневмоприводу з інерційним навантаженням. *Тези доповідей 5-го міжн. симпозіума українських інженерів-механіків у Львові*. Львів: Нац. ун-т "Львівська політехніка", 2001. С. 73–74.
- Kuznetsov Yu., Shinkarenko V. The genetic approach is the key to innovative synthesis of complicate technical systems. *Plovdiv, Fundamental sciences and applications*, 2011. No. 16, b.2. P. 211–219.
- Zablonsky K. I., Yaglinsky V. P., Gutuyra S. S., Bezuglenko O. U. Multi-criterion optimization functional trajectories of industrial robots. *Annals of DAAAM International*. Vienna, 2004. P. 37–38.
- Варжапетян А. Г. *Кваліметрія*. С.-Петербург: Изд. ГУАП, 2005. 134 с.
- Нахапетян Е. Г. *Кваліметрія механізмів машин-автоматів і промислових роботів. Кваліметрія і діагностування механізмів*. Москва: Наука, 1979. С. 4–32.



7. Азгальдов Г. Г., Райхман Э. П. *О квалиметрии*. Москва: Изд-во стандартов, 1973. 156 с.
8. Гутыря С. С. Управление техническим уровнем передач зацеплением на основе системной квалиметрической модели. *Труды Одес. политехн. ун-та*. Одесса, 2001. 2(14). С. 36–39.
9. Яглинский В. П. *Кинематика оборудования на основе механизмов параллельной структуры*. Коллективная монография. Прогрессивное машиностроительное оборудование. Орел: Изд. дом "Спектр", 2011. 455 с.
10. Гутыря С. С., Яглинский В. П., Обайди А. С. Підвищення технічного рівня механізмів паралельної структури і кінематики у складі технологічних комплексів. *Технологічні комплекси*, 2012. № 2,2 (5,6). С. 50–56.
11. Фролов К. В. *Методы совершенствования машин и современные проблемы машиностроения*. Москва: Машиностроение, 1984. 224 с.
12. Билинкіс В. Д. *Методы оценки технического уровня и конкурентоспособности продукции*. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. 155 с.
13. Яглинский В. П., Фелько М. В., Беликов В. Т. Багатокоординатний двосторонній модульний електропривод аерокосмічних тренажерних систем. *Патент України № 104273 від 10.01.2014*.
14. Яглинский, В. П., Обайди А. С., Фелько М. В. Повышение подвижности кабин динамических тренажеров мобильных машин. *Технологический аудит и резервы производства*, 2014. № 3/4 (17). С. 44–48.
15. Merlet J. P. *Parallel Robots*. The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006. 417 p.
5. Varjapetian A. G. *Qualimetria* [Qualimetry]. S.-Peterburg, GUAP Publ., 2005, 134 p.
6. Nakhapetian E.G. Kvalimetria mekhanizmov mashin-avtomatov i promyshlennykh roborov [The qualification of the mechanisms of automatic machines and industrial robots]. *Kvalimetria I diagnostirovanie mekhanizmov* [Qualification and diagnosis of mechanisms]. Moscow, Nauka Publ., 1979, pp. 4–32.
7. Azgaldov G. G., Raikhman E. P. *O qualimetrii* [About qualimetry]. Moscow, Standard Publ., 1973. 156 p.
8. Gutyrya S. S. Upravlenie tekhnicheskim urovnem peredach zacepleniem na osnove sistemnoy qalimetriceskoy modeli [The control of the technical level of the gears by gearing based on the systemymmetric model]. *Trudy Odes. politekhn. un-ta* [Proceedings of Odessa polytechnical. University]. Odessa, 2001, 2(14), pp. 36–39.
9. Yaglinsky V.P. *Kinematika oborudovania na osnove mekhanizmov parallelnoy struktury* [Kinematics of equipment based on mechanisms of parallel structure]. *Kollektivnaia monografiya* [Collective monograph]. Progressivnoie mashinostroitelnoe oborudovanie [Progressive machine-building equipment]. Orel. "Spectr" Publ., 2011, 455 p.
10. Gutyrya S. S., Yaglinsky V. P., Obaidi A. S. Pidvyshchennia rivnia mekhanizmv parallelnoy struktury i kinematyky u skladi tekhnologichnykh kompleksiv [Improvement of the technical level of mechanisms of parallel structure and kinematics in the technological complexes]. *Tekhnologichni kompleksi* [Technological complexes], 2012, 2,2 (5,6), pp. 50–56.
11. Frolov K. V. *Methody sovershenstvovania mashyn i sovremennye problemy mashinostroenia* [Methods of improving machines and modern problems of mechanical engineering]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1984. 224 p.

#### References (transliterated)

1. Kuznetsov Yu, Sklarov P. A. *Prognozuvannia rozvytku tekhnichnykh system*. [Forecasting the development of technical systems]. Kyiv, PP "ZMOK" Publ., 2004, 242 p.
2. Kindrazky V. Metodologia ta algotymy bagatokryterialnogo optymizatsiynogo syntezy pnevmopryvodu z inerziynym navantajenniam. [Methodology and Algorithm of Multicriterion Optimization Synthesis of Pneumatic Drive with Inertial Load]. *Tezy dopovidey 5-go mlyn. sympoziuma ukraïnskykh injeneriv-mekhanikiv u Lvovi* [Abstracts of the 5th intern. symposium of Ukrainian mechanical engineers in Lviv], [National University Lviv Polytechnic], 2001, pp. 73–74.
3. Kuznetsov Yu., Shinkarenko V. The genetic approach is the key to innovative synthesis of complicate technical systems. *Plovdiv, Fundamental sciences and applications*, 2011, No. 16, b.2. pp. 211–219.
4. Zablonsky K. I., Yaglinsky V. P., Gutyrya S. S., Bezuglenko O. U. Multi-criterion optimization functional trajectories of industrial robots. *Annals of DAAAM International*. Vienna, 2004. P. 37–38.
12. Bilinkis V. D. *Methody ozenki tekhnicheskogo urovnia i konkurentospobnosti produkzii* [Methods of evaluation of technical level and competitiveness of products]. Voroniesh, VGTU Publ., 2000, 155 p.
13. Yaglinsky V. P., Felko M. V., Belikov V. T. *Bagatokoordynatny dvostoronny modulny elektropryvod aerokosmichnykh trenajernykh system* [Multi-coordinate two-way modular electric actuator for aerospace training systems]. Patent of Ukraine, 104273. 2014.
14. Yaglinsky V. P., Obaidi A. S., Felko M. V. Povyshenie podvijnosti kabin dinamicheskikh trenajerov mobilnykh mashin [Increasing the mobility of the cabs of dynamic simulators of mobile machines]. *Tekhnologicheskyy audit i rezervy proizvodstva* [Technological audit and production reserves], 2014, 3/4 (17). pp. 44–48.
15. Merlet J. P. *Parallel Robots*. The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006. 417 p.

Надійшла (received) 15.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Козерацький Геннадій Володимирович (Козерацький Геннадий Владимирович, Kozerackyy Genadiy Volodymyrovich)** – Одеський національний політехнічний університет, старший викладач кафедри управління системами безпеки життєдіяльності; м. Одеса, Україна; e-mail: gena.kozeratskiy@mail.ru

**Яглинський Віктор Петрович (Яглинский Виктор Петрович, Yaglinsky Victor Petrovych)** – доктор технічних наук (Dr. habil. of Eng. S.), професор, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри підйомно-транспортного і робототехнічного обладнання; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9466-6927>; e-mail: v.p.yaglinskiy@oru.ua

**Хіхловський Анатолій Броніславович (Хихловский Анатолий Брониславович, Khikhlovskyy Anatoly Bronislavovich)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри теоретичної механіки; м. Одеса, Україна.

**Озернюк Олег Тимофійович (Озернюк Олег Тимофеевич, Ozerniuk Oleg Tymofiyovych)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри управління системами безпеки життєдіяльності; м. Одеса, Україна.