

В. П. ЯГЛИНСКИЙ, С. С. ГУТЫРЯ, Ю. М. ХОМЯК, В. Т. БЕЛИКОВ

ОБОБЩЕННЫЕ КРИТЕРИИ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Выполнен анализ соответствия совокупности функциональных показателей промышленных роботов признакам условий критериального подобия. С применением методов теории размерностей определены критерии подобия функциональных свойств грузоподъемности, быстродействия и динамичности промышленных роботов по вращательным и поступательным степеням подвижности. Создана необходимая совокупность критериев и предложена концепция определения обобщенных критериальных комплексов нагрузочной способности для модулей, агрегатов и всей конструкции робота в целом с применением метода дефрагментации и усреднения соответствующих критериев по степеням подвижности. Предложенный критерий быстродействия дает возможность сравнить быстродействие группы роботов по трем кинематическим показателям: скорости, ускорению и интервалу допустимых перемещений. Для роботов легкой грузоподъемности представлено техническую эволюцию рассматриваемых критериальных комплексов. Замечено, что с увеличением зоны достижимости робота критерий грузоподъемности для всех роботов снижается. Разработанные критерии позволяют оценить быстродействие и нагрузочную способность робота любой конструкции и могут быть использованы при определении технического уровня роботов и выявлении резервов его повышения.

Ключевые слова: степени подвижности; манипуляционная система; гомогенные функции; динамические параметры

В. П. ЯГЛИНСЬКИЙ, С. С. ГУТИРЯ, Ю. М. ХОМЯК, В. Т. БЕЛІКОВ

УЗАГАЛЬНЕНІ КРИТЕРІЇ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

Виконано аналіз відповідності сукупності функціональних показників промислових роботів ознакам умов критериальної подібності. Із застосуванням методів теорії розмірностей визначені критерії подібності функціональних властивостей вантажопідйомності, швидкодії і динамічності промислових роботів по обертовим та поступальним ступеням рухливості. Створено необхідну сукупність критеріїв і запропонована концепція визначення узагальнених критериальних комплексів навантажувальної спроможності для модулів, агрегатів і всієї конструкції робота в цілому із застосуванням методу дефрагментації і усереднення відповідних критеріїв за ступенями рухливості. Запропонований критерій швидкодії дає можливість порівняти швидкість групи роботів за трьома кінематичними показниками: швидкості, прискорення і інтервалу допустимих переміщень. Для роботів легкої вантажопідйомності представлено технічну еволюцію розглянутих критериальних комплексів. Помічено, що зі збільшенням зони досяжності робота критерій вантажопідйомності для всіх роботів знижується. Розроблені критерії дозволяють оцінити швидкість і навантажувальну здатність робота будь-якої конструкції і можуть бути використані при визначенні технічного рівня роботів і виявленні резервів його підвищення.

Ключові слова: ступені рухливості; маніпуляційна система; гомогенні функції; динамічні параметри

V. YAHLINSKYI, S. HUTYRYA, Yu. KHOMIAK, V. BELIKOV

GENERALIZED CRITERIA FOR LOADING CAPACITY OF INDUSTRIAL ROBOTS

The analysis of the correspondence of the set of functional indicators of industrial robots to the criteria of criteria similarity conditions is carried out. Using the methods of the theory of dimensions, criteria for the similarity of the functional properties of carrying capacity, speed-action and dynamism of industrial robots in terms of rotational and translational degrees of mobility have been determined. The necessary set of criteria has been created and a concept has been proposed for determining the generalized criterion complexes of the load capacity for modules, aggregates and the entire structure of the robot as a whole using the method of defragmentation and averaging the corresponding criteria by degrees of mobility. The proposed performance criterion makes it possible to compare the performance of a group of robots in terms of three kinematic indicators: speed, acceleration and the range of permissible displacements. For robots of light load capacity, the technical evolution of the considered criterion complexes is presented. It is noticed that with an increase in the reach of the robot, the criterion of load-carrying capacity for all robots decreases. The developed criteria make it possible to assess the speed action and loading capacity of a robot of any design and can be used to determine the technical level of robots and identify reserves for increasing it.

Key words: degrees of mobility; manipulation system; homogeneous functions; dynamic parameters

Введение. Использование роботизированного оборудования при создании гибких автоматизированных производств, позволяет решать задачи автоматизации на предприятиях с широкой номенклатурой продукции при мелкосерийном и штучном производстве. В условиях жесткой конкуренции повышения качества и снижения стоимости производимой продукции требуется организация комплексных мероприятий по мониторингу технического уровня и обеспечению нормативных значений показателей промышленных роботов (ПР). Сравнение продукции различных производителей требует создания соответствующих критериев, критериальных комплексов и обобщенных критериев функциональных свойств ПР. Кроме того, критериальный анализ свойств промышленных роботов необходимо выполнять при создании новых конструкций и реконструкции уже используемых в производстве.

Нагрузочная способность ПР характеризуется не

только массой транспортируемого груза, но и показателями быстродействия и динамичности.

Обзор известных исследований. В качестве характеристики быстродействия роботов ранее принималась максимальная скорость перемещения по отдельным степеням подвижности [1, 2] и минимальная длительность перехода ПР из одной заданной конфигурации в другую [3]:

$$V = \max V_i, \quad i = 1..n; \quad T = \min \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i)^2}, \quad (1)$$

где n – число степеней подвижности робота;

Δt_i – длительность переключений по i -ой степени подвижности робота.

Оптимизация по быстродействию в соответ-

© В. П. Яглинский, С. С. Гутьря,
Ю. М. Хомяк, В. Т. Беликов, 2021

ствии с (1) выполнялась варьированием моментов переключения двигателей степеней подвижности робота. На основе критериев (1) группой авторов разработан алгоритм оптимизации быстродействия манипулятора при ограничениях на скорости и ускорения [4].

Известны разработки решений проблем построения оптимальных управлений нелинейных динамических систем по критерию минимальной длительности процесса движения T при наличии различных ограничений на управляющие воздействия и фазовые координаты [5]. Основу систематического развития оптимизации динамических систем составили хорошо разработанные и апробированные в нелинейной механике методы [6]: малого параметра – усреднения (асимптотические методы разделения движений) и теории оптимального управления движением – принцип максимума с введением функции. В работе Горнова А. Ю. решена задача оптимизации маневра робота по времени быстродействия (1) с ограниченным влиянием различных степеней подвижности друг на друга [7]. В качестве критериев динамичности машин принимались отношения максимальных ускорений к квадратам средних скоростей [8, 9]:

$$K_D = \frac{\varepsilon_{\max}}{\omega_{cp}^2}; \quad K_{LD} = \frac{a_{\max}}{v_{cp}^2}. \quad (2)$$

Критерии (2) приняты также в качестве основных характеристик функциональных свойств промышленных роботов при проведении многокритериальной оптимизации и определении технического уровня ПР [10–14].

Методы физического подбора процессов в современных технических системах получили широкое и универсальное применение в научных исследованиях и проектных разработках на основе критериев технического уровня зубчатых передач, буксовых подшипников, ПР, троллейбусов и др. [15–18].

В работе [19] для оценки динамичности объектов предложен критерий в виде

$$П_4 = \frac{F\tau}{mv}, \quad (3)$$

где F – действующая сила на объект движения;

τ – время действия силы;

m и v – масса движущегося объекта и его усредненная скорость.

Критерии быстродействия (1)–(3) не полностью отражают кинематические возможности промышленных роботов, не учитываются значения циклических перемещений, максимальные скорости и ускорения при разгоне и торможении.

Постановка задач исследования. При выборе ПР ключевым фактором являются возможные движения и нагрузочная способность манипуляционной системы, основными характеристиками которых являются грузоподъемность, быстродействие и динамичность. Быстродействие любой технической системы определяется быстродействием ее составляющих подвижных элементов. Повышение быстродействия любой степени подвижности робота способствует возрастанию быстродействия всей системы ПР в целом. Каждая отдельно

взятая степень подвижности характеризуется одним простейшим движением: вращательным (*rotation*) вокруг одной оси либо поступательным (*translation*) вдоль одной оси. Значения кинематических параметров звеньев робота могут совпадать либо быть различными, но перечень размерных параметров, характеризующих свойства грузоподъемности, быстродействия и динамичности не могут зависеть от типа, назначения и области применения робота и для всех моделей робота должен быть одинаков. Кроме этого, при экспериментальных исследованиях очень трудно изменять одну переменную и остальные поддерживать на постоянном уровне, так как они взаимосвязаны. Следовательно, существенны не отдельные величины, а их комбинации, соответствующие этим воздействиям. Полученная комбинация дает новую критериальную переменную (комплекс), отражающую взаимосвязь нескольких параметров, по которой можно определять изменения, происходящие в исследуемом процессе. Такие комплексы представляют собой безразмерные критериальные функции, которые характеризуют подобные процессы.

Задачи исследования:

– провести анализ соответствия совокупности функциональных показателей промышленных роботов признакам условий критериального подбора;

– с применением методов теории размерностей определить критерии подбора функциональных свойств грузоподъемности, быстродействия и динамичности ПР по степеням подвижности;

– с применением метода дефрагментации представить конструкцию промышленных роботов в виде модулей и агрегатов и разработать концепцию определения обобщенных критериальных комплексов свойства «нагрузочная способность» модулей, агрегатов и всей конструкции ПР в целом;

– для одной из известных моделей ПР представить техническую эволюцию рассматриваемых критериальных комплексов.

Несмотря на известное многообразие сфер применения и конструкций универсальных ПР, их механизмы, сборочные единицы, детали и соединения характеризуются следующими признаками соответствия условиям критериального подбора:

– каждый робот обладает конкретной массой m_0 и может транспортировать определенную массу груза m_t ;

– основу каждого ПР составляет манипуляционная система, в которой каждая из степеней подвижности характеризуется простейшим движением: вращательным вокруг одной оси либо поступательным вдоль одной оси.

Таким образом, возможности движения каждой степени подвижности манипуляционной системы относятся к одному классу (простейших движений) и могут быть отнесены к подобным явлениям; каждое звено манипуляционной системы промышленных роботов характеризуется протяженностью вдоль одной оси (длиной) и может иметь характерные подобные геометрические параметры. Следовательно, функциональные свойств

ПР «грузоподъемность», «быстродействие» и «динамичность» характеризуются подобными явлениями, имеют все признаки соответствия условиям критериального подобия, и их возможности могут оцениваться критериальными комплексами.

Критериальный показатель функционального свойства «грузоподъемность». В зависимости от массы транспортируемого объекта стандартами предусмотрено распределение промышленных роботов на следующие группы грузоподъемности: сверхлегкие 0,08–1,0 кг; легкие 1,25–12 кг; средние 12,5–200 кг; тяжелые 250–1000 кг; сверхтяжелые – 1250 кг и выше. Критерий свойства грузоподъемность ПР можно представить критериальным симплексом

$$k_m = \frac{m_t}{m_0}. \quad (4)$$

Критериальный комплекс функционального свойства «быстродействие». Свойство «быстродействие» степеней подвижности роботов характеризуют следующие кинематические параметры:

для вращательного движения – угловая скорость ω , угловое ускорение ε , угол поворота φ , параметр времени t ;

для поступательного движения – скорость поступательного перемещения V , ускорение a , линейное перемещение S .

В процессе функционирования одного и того же ПР его размерные параметры быстродействия $(\omega, \varepsilon, t, \varphi)$ могут принимать различные значения в зависимости от условий выполнения технологической операции и являются переменными. Для сравнения подобных процессов в критериях подобия используются известные нормативные (паспортные) характеристики промышленных роботов или усредненные значения изменяемых параметров. за полный цикл работы $t_n = t$.

$$\begin{aligned} \varphi(t_n) &= \varphi, \quad \omega_n = \varphi_n / t_n = \varphi / t, \\ S(t_n) &= S, \quad V_n = S_n / t_n = S / t. \end{aligned} \quad (5)$$

Критериальный комплекс функционального свойства «быстродействие» характеризуют четыре кинематических параметра

$$k_\omega = f(\omega, \varepsilon, t, \varphi). \quad (6)$$

Параметры $(\omega, \varepsilon, t, \varphi)$ имеют такие размерности

$$[\omega] = [RT^{-1}]; [\varepsilon] = [RT^{-2}]; [t] = [T]; [\varphi] = [R], \quad (7)$$

где $[R]$ означает единицу угла поворота (радиан), а $[T]$ – единица времени.

В силу условий (7) из перечисленных четырех $(\omega, \varepsilon, t, \varphi)$ кинематических размерных параметров независимыми являются три, например, $(\varepsilon, \omega, \varphi)$. Тогда

$$k_\omega = f(\omega, \varepsilon, \varphi). \quad (8)$$

Для поступательных подвижностей аналогично

$$k_V = f(V, a, S). \quad (9)$$

Кроме того, в соответствии с (7) параметры имеют всего две независимых размерности (R, T) , значит из трех независимых величин в (8) в качестве основных размерных величин в уравнении (8) могут быть любые две, например, (ω, φ) . Остальная независимая размерная величина (ε) является производной.

Законы природы не могут зависеть от выбора тех или иных систем измерений. Единицы измерения производных величин и единицы измерения основных величин связаны друг с другом формулой размерности, которая имеет вид степенных одночленов (однородные или гомогенные функции) [20–22]. В соответствии с основной теоремой теории размерностей (π -теорема Бэкингема) [23–26] функциональная зависимость (8) между n_1 физическими независимыми размерными величинами всегда может быть преобразована в уравнение, содержащее $(n_1 - n_2)$ безразмерных комбинаций (безразмерные комплексы π) тех же n_1 физических размерных величин (n_2 – число основных независимых размерных величин). Для формулы (8) $n_1 = 3$ и $n_2 = 2$. Значит, для (8) имеется один критериальный комплекс. В этом случае вместо выражения (8) можно записать

$$k_\omega = f_1(\pi_1), \quad (10)$$

где π_1 – безразмерный единичный критериальный комплекс, который следует определить.

Выразим производную размерную величину (ε) уравнения (8) через безразмерное число π_1 и основные размерные величины (ω, φ) в некоторых степенях $(x_i, i = 1, 2)$ в виде гомогенных функций

$$\pi_1 = \frac{\varepsilon}{\omega^{x_1} \varphi^{x_2}}. \quad (11)$$

Переведем выражение (11) в уравнение размерностей (размерности величин в числителе и знаменателе должны быть одинаковы)

$$[\varepsilon] = [\omega]^{x_1} [\varphi]^{x_2}$$

или с учетом (7)

$$[RT^{-2}] = [RT^{-1}]^{x_1} \cdot [R]^{x_2}.$$

Приравнявая показатели размерностей при T и R , составим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} [R]: &\Rightarrow 1 = x_1 + x_2; \\ [T]: &\Rightarrow -2 = -x_1 \end{aligned} \right\}$$

Решая совместно полученные уравнения, находим значения неизвестных показателей

$$x_1 = 2; \quad x_2 = -1. \quad (12)$$

С учетом (12) выражение (11) принимает вид критериального комплекса $\pi_1 = \frac{\varepsilon\varphi}{\omega^2}$.

Величина, обратная π_1 , также представляет собой единичный критериальный комплекс

$$k_\omega = \frac{1}{\pi_1} = \frac{\omega^2}{\varepsilon\varphi}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что критериальный комплекс свойства «быстродействие» включает три независимые размерные параметры ($\varepsilon, \omega, \varphi$), которые характеризуют параметры движения конкретно взятой степени подвижности промышленных роботов. Аналогично находим критериальный комплекс быстродействия для поступательных степеней подвижности

$$k_v = \frac{v^2}{aS}. \quad (14)$$

Для промышленных роботов легкой грузоподъемности угловая скорость на валах степеней подвижности составляет 200...600°/с, а угловое ускорение изменяется от 20 до 80 с⁻² (табл. 1).

Таблица 1 – Статистические данные значений кинематических и динамических характеристик ПР легкой грузоподъемности типа PUMA фирмы FANUC модельного ряда: LR MATE 200, M10, M20, M710 [20]

Параметры кинематических и динамических характеристик ПР		Робот, серия, версия, тип					
		1	2	3	4	5	6
		LR MATE 200, iD, 4S	M10, iD, 12	M10, iD, 10L	M10, iD, 8L	M20, iD, 12L	M710, iC, 12L
Достижимость L , мм		550	1441	1636	2032	2272	3123
Угловые перемещения на осях степеней подвижности, °	φ_1	360	340	340	340	340	360
	φ_2	230	235	235	235	260	225
	φ_3	402	455	455	455	475	434
	φ_4	380	380	380	380	400	400
	φ_5	240	360	360	360	360	380
	φ_6	720	900	900	900	900	720
Максимальные угловые скорости на осях степеней подвижности, °/с	ω_1	460	260	260	210	210	180
	ω_2	460	240	240	210	210	180
	ω_3	520	260	260	220	265	180
	ω_4	560	430	430	430	420	400
	ω_5	560	450	450	450	450	430
	ω_6	900	720	720	720	720	630
Масса транспортируемого груза m_t , кг		4	12	10	8	12	12
Масса робота m_0 , кг		20	145	150	180	250	540
Критерий грузоподъемности k_m		0.2	0.0828	0.0667	0.0444	0.0480	0.0222
Крутящий момент/момент инерции $H \cdot \text{м} / (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$	$M_1/J_1, \dots, M_5/J_5$	8,86/0,2	26/0,9	22/0,65	16,1/0,63	22/0,65	22/0,65
	M_6/J_6	4,9/0,067	11/0,3	9,8/0,17	5,9/0,61	9,8/0,17	9,8/0,17
Угловое ускорение, 1/с ²	ε_1	44.3	28.9	40.0	25.5	33.8	33.8
	ε_2	44.3	28.9	40.0	25.5	33.8	33.8
	ε_3	44.3	28.9	40.0	25.5	33.8	33.8
	ε_4	44.3	28.9	40.0	25.5	33.8	33.8
	ε_5	44.3	28.9	40.0	25.5	33.8	33.8
	ε_6	73.0	36.7	57.6	96.0	57.6	57.6

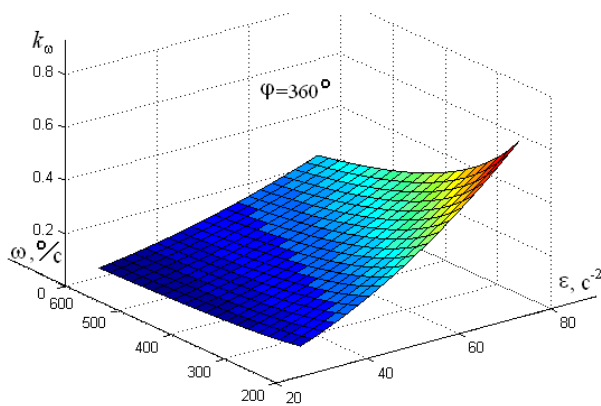


Рисунок 1 – Диаграмма критерия быстродействия для промышленных роботов легкой грузоподъемности при $\varphi=360^\circ$, табл. 1

Для ПР средней и тяжелой грузоподъемности соответствующие характеристики изменяются в пределах $50\dots 200\text{ }^\circ/\text{с}$ и $2\dots 14\text{ с}^{-2}$. Для увеличения быстродействия ПР уменьшают значения углов поворота модулей степеней подвижности. Так, уменьшение угла поворота с 360° до 250° приводит к увеличению значений критерия быстродействия почти в 2 раза.

В табл. 1 приведены статистические данные значений характеристик шести ПР (номера 1...6) легкой грузоподъемности типа по мере возрастания зоны достижимости PUMA фирмы FANUC модельного ряда: LR MATE 200, M10, M20, M710 [20].

Рис. 1 иллюстрирует зависимость критерия быстродействия для промышленных роботов легкой грузоподъемности при $\varphi=360^\circ$. Из этого рисунка видно, что на критерий большое влияние имеет ускорение ϵ . Установлено, что распределение критерия быстродействия по степеням подвижности ПР крайне неравномерно (рис. 2).

Замечено, что ориентирующие степени подвижности (рис. 2, номера 4–6) обладают значительно большими значениями критериев быстродействия по сравнению с транспортирующими (номера 1–3).

Выявлено, что с увеличением зоны достижимости ПР легкой грузоподъемности по всем транспортирующим степеням подвижности критерий быстродействия уменьшается (рис. 2, номера подвижностей 1–3).

Обращается внимание, что критерий быстродействия пятой степени подвижности (рис. 2, рядок № 5) превышает в 2 раза критерий быстродействия шестой степени подвижности (рис. 2, рядок № 6).

Быстродействие любой технической системы определяется быстродействием ее составляющих подвижных элементов. Повышение быстродействия любой степени подвижности робота способствует возрастанию быстродействия всей системы промышленных роботов в целом.

Критерий быстродействия ориентирующих степеней подвижности почти не зависит от зоны достижимости промышленных роботов. Критерии (13) и (14) позволяют оценить быстродействие ПР по всем степеням подвижности и дают возможность

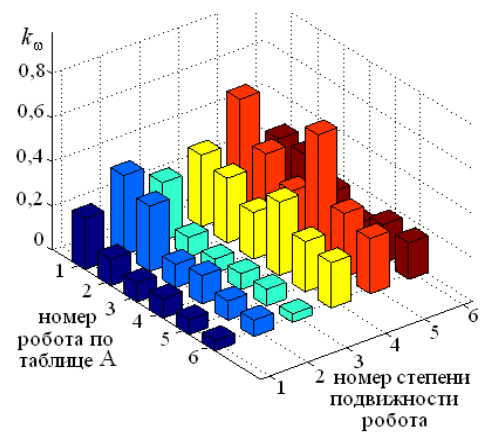


Рисунок 2 – Диаграмма критериев быстродействия по степеням подвижности промышленных роботов легкой грузоподъемности, табл. 1

сравнить быстродействие группы ПР по трем кинематическим характеристикам: скорости, ускорению и интервалу допустимых перемещений.

Определение критерия динамичности промышленных роботов. Свойство «динамичности» степеней подвижности роботов характеризуют следующие динамические и кинематические параметры.

Для *вращательных степеней подвижности*: M_A – вращательный момент относительно оси вращения; J_A – осевой момент инерции объекта вращения; ω , ϵ – угловая скорость и угловое ускорение; φ – угол поворота; t – параметр времени.

Для *поступательных степеней подвижности*: F – осевая сила; m_z – масса объекта перемещения (звена ПР); V , a – скорость и ускорение поступательного перемещения; S – линейное перемещение.

Рассмотрим критериальный комплекс динамичности промышленных роботов для поступательных степеней подвижности, который характеризуется пятью независимыми величинами ($n_1=5$):

$$\pi = f(F, m, V, a, S). \quad (15)$$

Размерности параметров в (15) имеют вид

$$[m] = [M]; [F] = [MLT^{-2}]; [V] = [LT^{-1}]; [a] = [LT^{-2}]; [S] = [L], \quad (16)$$

где M означает единицу массы, а L – единица длины.

В выражении (15) из всех пяти независимых размерных величин ($n_1=5$) независимых единиц измерения (M, L, T) всего три ($n_2=3$). Значит, выражение (15) имеет $(n_1 - n_2) = 2$ независимых критериальных комплекса, определяемых с помощью однородных функций типа (11). В качестве основных (образующих) размерных величин из пяти независимых (F, m, V, a, S) можно выбрать любые три, например, (m, V, a) . Остальные две размерные величины (F, S) будут производными и в соответствии с

гомогенными функциями (11):

$$\pi_2 = \frac{F}{m^{x_1} V^{x_2} a^{x_3}}; \quad \pi_3 = \frac{S}{m^{y_1} V^{y_2} a^{y_3}}, \quad (17)$$

где π_1, π_2 – безразмерные критериальные комплексы; $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ – показатели степени, которые нужно определить из условий равенства размерностей в числителе и знаменателе выражений (17).

Переведем выражения (17) в уравнения размерностей (размерности величин в числителе и знаменателе должны быть одинаковы):

$$[F] = [m]^{x_1} [V]^{x_2} [a]^{x_3}, \quad [S] = [m]^{y_1} [V]^{y_2} [a]^{y_3}$$

или с учетом (16)

$$[MLT^{-2}] = [M]^{x_1} [LT^{-1}]^{x_2} [LT^{-2}]^{x_3}, \\ [L] = [M]^{y_1} [LT^{-1}]^{y_2} [LT^{-2}]^{y_3}.$$

Приравнивая показатели размерностей при M, L и T , составим систему алгебраических уравнений

$$\left. \begin{array}{l} [M]: \Rightarrow 1 = x_1; \\ [L]: \Rightarrow 1 = x_2 + x_3; \\ [T]: \Rightarrow -2 = -x_2 - 2x_3; \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} [M]: \Rightarrow 0 = y_1; \\ [L]: \Rightarrow 1 = y_2 + y_3; \\ [T]: \Rightarrow 0 = -y_2 - 2y_3. \end{array} \right\}$$

Решая совместно полученные уравнения, находим значения неизвестных показателей

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = 1; \quad x_2 = 0; \quad x_3 = 1 \\ y_1 = 0; \quad y_2 = 2; \quad y_3 = -1 \end{array} \right\}. \quad (18)$$

С учетом (18) выражения (17) имеют вид

$$\pi_2 = \frac{F}{ma}, \quad \pi_3 = \frac{aS}{V^2}. \quad (19)$$

Перемножая критериальные комплексы (19), получим групповой критериальный комплекс динамичности для поступательной степени подвижности ПР

$$k_{d,v} = \frac{FS}{m_z V^2}. \quad (20)$$

Заметим, что вторая часть (19) критерия π_2 представляет величину, обратную критерию быстрогодействия (14). Для вращательной подвижности промышленных роботов:

$$k_{d,\omega} = \frac{M\phi}{J_A \omega^2}. \quad (21)$$

Групповые критериальные комплексы (20) и (21) называют критериями Ньютона

$$Ne^V = \frac{FS}{m_z V^2}; \quad Ne^\omega = \frac{M\phi}{J_A \omega^2}.$$

После определения критериев динамичности (20) и (21) по отдельным степеням подвижности методом усреднения находим критерии быстрогодействия и динамичности отдельных модулей, агрегатов и всей конструкции промышленных роботов в целом K_ω и K_d :

$$K_\omega = \frac{1}{n_z} \sum_{i=1}^{n_z} k_{\omega,i}, \quad K_d = \frac{1}{n_z} \sum_{i=1}^{n_z} k_{d,i}, \quad (22)$$

где n_z – число степеней подвижности;

$k_{\omega,i}$ и $k_{d,i}$ – критерии быстрогодействия и динамичности i -ой степени подвижности соответственно.

Обобщенный критерий нагрузочной способности всей конструкции промышленных роботов можно представить в виде произведения двух соответствующих критериев (4) и (22).

$$K = k_m \cdot K_d. \quad (23)$$

Установлено, что с увеличением зоны досяжимости ПР критерий нагрузочной способности по всем степеням подвижности уменьшается (рис. 3).

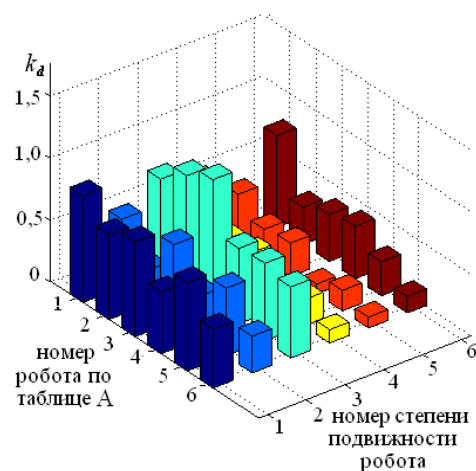


Рисунок 3 – Критерии динамичности по степеням подвижности промышленных роботов легкой грузоподъемности, табл. 1

Для промышленных роботов легкой грузоподъемности наибольшую динамическую нагруженность имеют транспортирующие степени подвижности. Анализ нагруженности ПР свидетельствует о неравномерной нагруженности роботов в группах и значительной недогруженности ориентирующих степеней подвижности для роботов всех конструкций (рис. 3). Кроме того, для промышленных роботов легкой грузоподъемности выявлено значительное уменьшение нагруженности при увеличении зоны досяжимости.

Таким образом, производители ПР при увеличении зоны досяжимости сознательно планируют

снижение нагруженности манипуляционной системы роботов, не уменьшая грузоподъемности.

Из рис. 3 видно, что критерий динамичности для первой и шестой степени подвижности у робота № 1 почти одинаковы в отличие от остальных роботов.

Выводы. Проведен анализ соответствия совокупности функциональных показателей промышленных роботов признакам условий критериального подобия, и с применением методов теории размерностей определены критерии подобия функциональных свойств грузоподъемности, быстродействия и динамичности ПР по степеням подвижности.

Предложена концепция определения обобщенных критериальных комплексов свойств грузоподъемности, быстродействия и динамичности для модулей, агрегатов и всей конструкции промышленных роботов в целом с применением метода дефрагментации и усреднения соответствующих критериев по степеням подвижности. Для трех групп ПР легкой, средней и тяжелой грузоподъемности представлено техническую эволюцию рассматриваемых критериальных комплексов. Выявлено неравномерное распределение значений критериев быстродействия и динамичности по степеням подвижности ПР.

Разработанные критерии позволяют оценить быстродействие и нагруженность промышленных роботов по всем степеням подвижности и дают возможность сравнить быстродействие и нагруженность группы ПР. Критерии могут быть использованы при определении технического уровня ПР и выявлении резервов его повышения.

Список литературы

1. Юревич Е. И. *Основы робототехники*. Львов: Машиностроение, 1985. 270 с.
2. Ямпольский Л. С., Яхимович В. А., Вайсман Е. Г., Дремчук Б. А., Козаченко Л. А. *Промышленная робототехника*. Киев: Техніка, 1984. 267 с.
3. Воробьев Е. И., Козырев Ю. Г., Царенко В. И. *Промышленные роботы агрегатно-модульного типа*. Москва: Машиностроение, 1988. 237 с.
4. *Механика роботов и манипуляторов*. Т. 1. Москва: Высшая школа, 1988. 304 с.
5. Черноусько Ф. Л., Ананьевский И. М., Решмин С. А. *Методы управления нелинейными механическими системами*. Москва: Физматлит, 2006. 328 с.
6. Акуленко Л. Д. *Асимптотические методы оптимального управления*. Москва: Наука, 1987. 368 с.
7. Горнов А. Ю. Численные методы исследования задач оптимального управления в механических системах. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010. № 8. С. 2–7.
8. Новикова Е. А. Обоснование критериев плавности мехатронных приводов поступательного перемещения. *Фундаментальные исследования*. 2012. № 3. С. 123–128. URL: <http://www.fundamental-research.ru/article/view?id=29350>
9. Аншин С. С., Бабич А. В., Баранов А. Г. и др. *Проектирование и разработка промышленных роботов*. Москва: Машиностроение, 1989. 272 с.
10. Нахпетян Е. Г. Квалиметрия механизмов машин-автоматов и промышленных роботов. *Квалиметрия и диагностирование механизмов*. Москва: Наука, 1979. С. 4–32.
11. Bezuglenko, A., Gutyrya, S., Yaglinsky, V. Multi-Criterion Optimization Functional Trajectories of Industrial Robots. *Annals of DAAAM International*. Vienna, 2004. P. 037–038.
12. Gutyrya, S., Yaglinsky, V. System Criteria Analysis and Function Optimization of Industrial Robots. *ENERGIA'2006. TEKA* Kom. Mol. Energ. Roln., 6A, Lublin, 2006. P. 70–81.
13. Гутья С.С., Яглинский В.П. Теория и практика моделирования технического уровня технологических машин. *Моделиро-*

вание технологических процессов механической обработки и сборки. Т. 2, раздел 6, Specter, Москва, 2014. С. 224–272.

14. Yaglinsky V., Al-Obaidi A., Kozeracki G., Moskvitchov M. Kinematics Rods of Simulator-Hexapod. *British Journal of Applied Science & Technology*. 2016. № 16(3). P. 1–7.
15. Гутья С., Заблонский К., Яглинский В. System Modeling of Gears Design Quality. *VDI-Berichte*, 1904.1. 2005. P. 417–434.
16. Gutyrya, S., Yaglinsky, V., Gaydamaka, A. System Model of Technical Level of Rolling Bearings. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2016. 13(2). P. 1–9.
17. Hutyria S., Yaglinsky V., Chanchin A., Khomiak Yu., Popov V.. Evolution of Trolley-bus: Directions, Indicators, Trends. *Diagnostika*. 2020. Vol. 21, no. 1. P. 11–26.
18. Yaglinsky V., Gutyrya, S., Chanchin A., Parametrical Fluctuations of Epicycle in Wheel Gearboxes. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2016, 15(2). P. 1–8.
19. Bahman Sohuri. *Dimensional Analysis and Self-Similarity Methods for Engineers and Scientists*. Springer. 2015. 317 p.
20. Интернет pecypc: www.FANUC.EU
21. Ain A. Sonin. The Physical Basis of Dimensional Analysis. *Department of Mechanical Engineering MIT Cambridge, MA 02139*, 2001. 50 p. http://web.mit.edu/2.25/www/pdf/DA_unified.pdf
22. Gibbins J. C. *Dimensional Analysis*. Springer, 2011. 297 p. <https://www.springer.com/gp/book/9781849963169>
23. Kunes J. Similarity and modeling in science and engineering. *Cambridge International Science Publishing*, 2012. 449 p. <https://www.springer.com/gp/book/9781907343773>
24. Zohuri Bahman. *Dimensional Analysis and Self-Similarity Methods for Engineers and Scientists*. Springer, N.-Y., 2015. 372 p. <https://www.springer.com/gp/book/9783319134758>
25. Simon Volker, Weigand Bernhard, Gomaa Hassan. *Dimensional Analysis for Engineers*. Springer, 2017. P. 144. <https://www.springer.com/gp/book/9783319520261>
26. Mark C. Albrecht, Christopher J. Nachtheim, Thomas A. Albrecht & R. Dennis Cook. Experimental Design for Engineering Dimensional Analysis. *Technometrics*. 2013. Vol. 55, Iss. 3. P. 257–270. <https://www.tandfonline.com/toc/utch20/55/3>

References (transliterated)

1. Yurevitch E. I. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of Robotics]. Lviv, Mashinostroenie Publ., 1985. 270 p.
2. Yampolski L. S., Yahimovich V. A., Vaisman E.G., Dremchuk B. A., Kozachenko L. A. *Promyshlennaya robototekhnika* [Industrial robotics]. Kyiv. Tehnika Publ., 1984. 267 p.
3. Vorobyov E. I., Kozyrev Yu. G., Zarenko V. I. *Promyshlennye roboty agregatno-modulnogo tipa* [Industrial robots of aggregate-modular type]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1988. 237 p.
4. *Mekhanika robotov i manipulatorov* [Mechanics of robots and manipulators], T. 1. Moscow. Vyshaya shkola Publ., 1988. 304 p.
5. Chernousko F. L., Ananievski I. M., Reshmin S. A., *Methody upravleniya nelineinymi mekhanicheskimi sistemami* [Control methods for nonlinear mechanical systems]. Moscow. Fizmatlit. Publ., 2006. 328 p.
6. Akulenko L. D. *Asimptoticheskie metody optimalnogo upravleniya* [Asymptotic Optimal Control Methods]. Moscow. Nauka Publ., 1987. 368 p.
7. Gornov A. Yu. Chislennye metody issledovaniya zadach optimalnogo upravleniya mekhanicheskimi sistemami [Numerical methods for studying optimal control problems in mechanical systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsia, upravlenie* Publ.. 2010, no. 8, pp. 2–7.
8. Nowikowa E. A. Obosnowanie kritheriev plawnosti mekhatronnyh priwodow postupatelno peremeszenia [Substantiation of the criteria for the smoothness of mechatronic drives of translational movement]. *Fundamentalnye issledovania* [Basic research] Publ., 2012, no. 3, pp. 123–128. URL: <http://www.fundamentalresearch.ru/article/view?id=29350>
9. Anshyn S. S., Babich A.W., Baranow A. G. *Proektirovanie i razrabotka promyshlennykh robotow*. [Design and development of industrial robots]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1989. 272 p.
10. Nakhpetian E. G. *Kvalimetria mekhanismow mashin-avtomatow promyshlennykh robotow* [Qualimetry of mechanisms of automatic machines and industrial robots]. Moscow. Nauka Publ., 1979, pp. 4–32.
11. Bezuglenko, A., Gutyrya, S., Yaglinsky, V. Multi-Criterion Optimization Functional Trajectories of Industrial Robots. *Annals of DAAAM International*. Vienna, 2004, pp. 037–038.
12. Gutyrya, S., Yaglinsky, V. System Criteria Analysis and Function

- Optimization of Industrial Robots. *ENERGIA'2006. TEKA* Kom. Mol. Energ. Roln., 6A, Lublin, 2006, pp. 70–81.
13. Hutyria S. S., Yahlinskiy V. P. Theoria i praktika modelirovaniya tekhnicheskogo urovnia tekhnologicheskikh mashin [Theory and practice of modeling the technical level of technological machines]. Modelirovanie tekhnologicheskikh processov mekhanicheskoy obrabotki i sborki [Modeling of technological processes of machining and assembly]. T. 2/6. Moscow. Specter Publ., 2014, pp. 224–272.
 14. Yaglinskiy V., Al-Obaidi A., Kozeracki G., Moskvitchov M. Kinematics Rods of Simulator-Hexapod. *British Journal of Applied Science & Technology*. 2016, no. 16(3), pp. 1–7.
 15. Gutyrya, S., Zablonsky, K., Yaglinsky, V., System Modeling of Gears Design Quality. *VDI-Berichte*, 1904.1. 2005, pp. 417–434.
 16. Gutyrya, S., Yaglinskiy, V., Gaydamaka, A. System Model of Technical Level of Rolling Bearings. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2016, 13(2), pp. 1–9.
 17. Hutyria S., Yaglinskiy V., Chanchin A., Khomiak Yu., Popov V.. Evolution of Trolley-bus: Directions, Indicators, Trends. *Diagnostika*. 2020, vol. 21, no. 1, pp. 11–26.
 18. Yaglinskiy V., Gutyrya, S., Chanchin A. Parametrical Fluctuations of Epicycle in Wheel Gearboxes. *British Journal of Applied Science & Technology*. 2016, 15(2), pp. 1–8.
 19. Bahman Sohuri. *Dimensional Analysis and Self-Similarity Methods for Engineers and Scientists*. Springer. 2015. 317 p.
 20. Internet resource: www.FANUC.EU
 21. Ain A. Sonin. The Physical Basis of Dimensional Analysis. *Department of Mechanical Engineering MIT Cambridge, MA 02139*, 2001. 50 p. http://web.mit.edu/2.25/www/pdf/DA_unified.pdf
 22. Gibbings J. C. Dimensional Analysis. *Springer*, 2011. 297 p. <https://www.springer.com/gp/book/9781849963169>
 23. Kunes J. Similarity and modeling in science and engineering. *Cambridge International Science Publishing*, 2012. 449 p. <https://www.springer.com/gp/book/9781907343773>
 24. Zohuri Bahman. Dimensional Analysis and Self-Similarity Methods for Engineers and Scientists. *Springer*, N.-Y., 2015. 372 p. <https://www.springer.com/gp/book/9783319134758>
 25. Simon Volker, Weigand Bernhard, Goma Hassan. Dimensional Analysis for Engineers. Springer, 2017, pp. 144. <https://www.springer.com/gp/book/9783319520261>
 26. Mark C. Albrecht, Christopher J. Nachtsheim, Thomas A. Albrecht & R. Dennis Cook. Experimental Design for Engineering Dimensional Analysis. *Technometrics*. 2013, vol. 55, iss. 3, pp. 257–270. <https://www.tandfonline.com/toc/utch20/55/3>

Поступила (received) 31.08.2021

Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

Ягліньський Віктор Петрович (Яглинский Виктор Петрович, Yahlinskiy Viktor) – доктор технічних наук (Dr. of Tech. S.), професор, Державний університет «Одеська політехніка», професор кафедри підйомно-транспортного і робототехнічного обладнання; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9466-6927>; e-mail: v.p.yaglinskiy@op.edu.ua

Гутиря Сергій Семенович (Гутиря Сергей Семенович, Hutyrya Serhiy) – доктор технічних наук (Dr. of Tech. S.), професор, Державний університет «Одеська політехніка», декан Українсько-іспанського інституту; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1257-3933>; e-mail: sergutyrya@gmail.com

Хомяк Юрій Мефодійович (Хомяк Юрий Мефодиевич, Khomiak Yuriy) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Державний університет «Одеська політехніка», доцент кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0093-8405>; e-mail: jomiak38@gmail.com

Беліков Віктор Трифонович (Беликов Виктор Трифонович, Belikov Viktor) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Одеська Військова Академія, старший науковий співробітник; м. Одеса, Україна; e-mail: vi3bel@ukr.net