

УДК 621.01:681.3

В. О. Кузнецов, А. Б. Коломієць, Я. Б. Стеців*Українська академія друкарства***АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ШАРНІРНОГО
ЧОТИРИЛАНКОВИКА ЗІ ЗМІННОЮ ДОВЖИНОЮ ВЕДЕНОЇ ЛАНКИ**

Для поліпшення характеристик приводу виконавчих механізмів поліграфічних і пакувальних машин пропонується оригінальний механізм зі змінною довжиною веденої ланки. Виявляються особливості запропонованого кулачково-важільного механізму. Подається методика та програмне забезпечення для проведення аналітичних розрахунків кінематики механізму. Проведені дослідження дають можливість визначити оптимальні параметри конструкції та розробити рекомендації із конструювання промислового обладнання.

Розрахунок, синтез, чотириланковик, кулачок, кінематика, програма, AutoLISP, функція

Для виробництва картонної тари широко експлуатують операційні автомати та автоматизовані комплекси, в яких виконуються поштучне виведення розгорток з самонакладу, формування об'ємної конструкції фальцюванням і складання готової продукції у стоси. Продуктивність такого обладнання залежить від самонакладів, проте останні мають обмеження через особливості приводу. Застосування пневматичного приводу обмежене високою вартістю, нерівномірністю спрацювання, складністю забезпечення умов узгодженого переміщення напівфабрикатів [3].

Механічні механізми горизонтального переміщення розгорток складаються зазвичай з двох контурів, є матеріаломісткими через наявність хитних ланок значних розмірів. Наприклад, у пристрої [8] виведення аркушевих напівфабрикатів (розгорток) з магазину здійснюють штовхачі каретки, рух якій надає комбінований важільний механізм. Окрім металомісткості конструкції, проблемною є експлуатація пристрою для виведення напівфабрикатів, оскільки хитний рух коромисла спричиняє значні інерційні навантаження. Це обмежує його продуктивність обладнання.

Отож актуальним є розроблення нового продуктивного, надійного в експлуатації пристрою, що укомплектований засобами плавного розгону та уповільнення веденої ланки протягом кінематичного циклу. Значну увагу вдосконаленню подібних механізмів приділено у працях [1, 4].

На кафедрі ППМТП Української академії друкарства було запропоновано й отримано патент [5] на винахід оригінального пристрою для виведення плоских напівфабрикатів. Він складається зі столу і важільного механізму (кривошипа, шатуна, двопроменевого коромисла, тяги, штовхача, який переміщується вздовж напрямної). Особливість механізму полягає у тому, що на одному з променів двопроменевого коромисла встановлено камінь з роликом, який переміщується у нерухомому криволінійному пазу. Запропонований ме-

Як відомо з [6], довжини у ШРМ визначаються у відносних одиницях, де радіус кривошипа прийнятий за $r = 1$:

$$\lambda_1 = b/r, \lambda_2 = l_u/r, \lambda_3 = l_k/r.$$

У випадку змінної довжини коромисла його довжина визначатиметься залежністю

$$l_k = l_{k0} + s_{di} = l_{k0} + a_k \cdot [S].$$

При цьому, якщо у крайньому положенні коромисла $\lambda_{30} = l_{k0}/r_{kr}$ і $S_i = S/r$, то поточне значення $\lambda_3 = l_{k0}/r + (a_k \cdot [S])/r = \lambda_0 + a_k \cdot [S] = \lambda_0 + s_i$.

Кутові переміщення ланок механізму визначаються параметричними рівняннями

$$\Delta = \sqrt{\lambda_1^2 + 1 - 2 \cdot \lambda_1 \cdot \cos \varphi}$$

$$\gamma_1 = \arccos \frac{\cos \varphi - \lambda_1}{\Delta}$$

$$\gamma_2 = \arccos \frac{\lambda_2^2 - \lambda_3^2 + \Delta^2}{2\lambda_2 \Delta}$$

$$\mu = \arccos \frac{\lambda_2^2 + \lambda_3^2 - \Delta^2}{2\lambda_2 \lambda_3},$$

а кути коромисла $\gamma = \gamma_1 - \pi + \gamma_2 + \mu$ і шатуна $\delta = \gamma + \gamma_2 - \pi$.

У цих рівняннях інваріант змінної довжини коромисла $\lambda_3 = \lambda_0 + s_i$. Внаслідок цього поточні значення кутів γ_2 і μ визначаються при зміні значення $s_i = a_k \cdot [S]$.

Якщо у ШРМ φ — кутове переміщення кривошипа, γ — кутове переміщення коромисла, δ — кутове переміщення шатуна, то рівняння замкненого векторного контуру на напрямок базовідстані

$$(\lambda_0 + s_i) \times \cos \gamma - \lambda_2 \times \cos \delta - \cos \varphi = \lambda_1$$

або

$$\lambda_0 \times \cos \gamma + s_i \times \cos \gamma - \lambda_2 \times \cos \delta - \cos \varphi = \lambda_1. \quad (1)$$

Похідна від рівняння (1) забезпечує визначення кутових швидкостей ланок механізму

$$\lambda_2 \times \sin \delta \times \omega_{2i} + \sin \varphi + (\partial s_i / \partial \varphi) \times \cos \gamma = \lambda_0 \times \sin \gamma \times \omega_{3i} + s_i \times \sin \gamma \times \omega_{3i}.$$

Значення $\partial s_i / \partial \varphi$ можна подати як

$$\partial s_i / \partial \varphi = (\partial s_i / \partial k) \times (\partial k / \partial \varphi).$$

У цьому виразі (оскільки, $k = \varphi_i / \varphi_{пк}$)

$$\partial k = \partial(\varphi_i / \varphi_{пк}) \text{ або } \partial k = \partial \varphi_i / \varphi_{пк}.$$

Тоді $\partial k / \partial \varphi = 1 / \varphi_{\text{пк}}$.

$$\partial s_i / \partial k = \partial a_k \cdot [S_i] / \partial k = b_k \times [S_i].$$

Тоді $\partial s_i / \partial \varphi = b_k \times [S_i] / \varphi_{\text{пк}}$. Загальне рівняння

$$\begin{aligned} \lambda_2 \times \sin \delta \times \omega_{2i} + \sin \varphi + b_k \times \cos \gamma \times [S_i / \varphi_{\text{пк}}] &= \lambda_0 \times \sin \gamma \times \omega_{3i} + s_i \times \sin \gamma \times \omega_{3i} \\ \lambda_2 \times \sin \delta \times \omega_{2i} + \sin \varphi + b_k \times \cos \gamma \times [S_i / \varphi_{\text{пк}}] &= (\lambda_0 + s_i) \times \sin \gamma \times \omega_{3i} \end{aligned} \quad (2)$$

Значення кутових швидкостей і прискорень ланок механізму визначаються методом повороту координатних осей на поточний кут однієї з ланок у поточному положенні механізму.

При повороті на кут δ рівняння (2)

$$\lambda_2 \times \sin(\delta - \delta) \times \omega_{2i} + \sin(\varphi - \delta) + b_k \times \cos(\gamma - \delta) \times [S_i / \varphi_{\text{пк}}] = (\lambda_0 + s_i) \times \sin(\gamma - \delta) \times \omega_{3i}$$

У цьому виразі $\lambda_2 \times \sin(\delta - \delta) \times \omega_{2i} = 0$, тоді

$$\omega_{3i} = \frac{\sin(\varphi - \delta) + b_k \cos(\gamma - \delta) [S_i / \varphi_{\text{пк}}]}{(\lambda_0 + s_i) \cdot \sin(\gamma - \delta)}. \quad (3)$$

При повороті на кут γ рівняння (2)

$$\lambda_2 \times \sin(\delta - \gamma) \times \omega_{2i} + \sin(\varphi - \gamma) + b_k \times \cos(\gamma - \gamma) \times [S_i / \varphi_{\text{пк}}] = (\lambda_0 + s_i) \times \sin(\gamma - \gamma) \times \omega_{3i}$$

У цьому виразі

$$\begin{aligned} (\lambda_0 + s_i) \cdot \sin(\gamma - \gamma) \cdot \omega_{3i} &= 0, \\ b_k \cdot \cos(\gamma - \gamma) \cdot [S_i / \varphi_{\text{пк}}] &= b_k \cdot [S_i / \varphi_{\text{пк}}], \\ \omega_{2i} &= \frac{\sin(\varphi - \gamma) + b_k [S_i / \varphi_{\text{пк}}]}{\lambda_2 \cdot \sin(\gamma - \delta)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Похідна від виразу (2)

$$\begin{aligned} \lambda_2 \times \cos \delta \times \omega_{2i}^2 + \lambda_2 \times \sin \delta \times \varepsilon_{2i} + \cos \varphi + c_k \times \cos \gamma \times [S_i / \varphi_{\text{пк}}^2] - b_k \times \sin \gamma \times \omega_{3i} \times [S_i / \varphi_{\text{пк}}] &= \\ = (\lambda_0 + s_i) \times \cos \gamma \times \omega_{3i}^2 + (\lambda_0 + s_i) \times \sin \gamma \times \varepsilon_{3i}. \end{aligned} \quad (5)$$

При повороті на кут δ рівняння (5)

$$\begin{aligned} \lambda_2 \cdot \cos(\delta - \delta) \cdot \omega_{2i}^2 + \lambda_2 \cdot \sin(\delta - \delta) \cdot \varepsilon_{2i} + \cos(\varphi - \delta) + c_k \cdot \cos(\gamma - \delta) \cdot [S_i / \varphi_{\text{пк}}^2] - \\ - b_k \cdot \sin(\gamma - \delta) \cdot \omega_{3i} \cdot [S_i / \varphi_{\text{пк}}] = (\lambda_0 + s_i) \cdot \cos(\gamma - \delta) \cdot \omega_{3i}^2 + (\lambda_0 + s_i) \cdot \sin(\gamma - \delta) \cdot \varepsilon_{3i}. \end{aligned}$$

Кутове прискорення коромисла

$$\varepsilon_{3i} = \frac{\cos(\varphi - \delta) + c_k \cos(\gamma - \delta) [S_i / \varphi_{\text{пк}}^2] + \lambda_2 \omega_{2i}^2 - b_k \sin(\gamma - \delta) \omega_{3i} [S_i / \varphi_{\text{пк}}] - (\lambda_0 + s_i) \cos(\gamma - \delta) \omega_{3i}^2}{(\lambda_0 + s_i) \cdot \sin(\gamma - \delta)}$$

$$\varepsilon_{3i} = \frac{\cos(\varphi - \delta) + c_k \cos(\gamma - \delta) [S_i / \varphi_{\text{нх}}^2] + \lambda_2 \omega_{2i}^2}{(\lambda_0 + s_i) \cdot \sin(\gamma - \delta)}$$

$$- \frac{b_k \sin(\gamma - \delta) \omega_{3i} [S_i / \varphi_{\text{нх}}] - (\lambda_0 + s_i) \cos(\gamma - \delta) \omega_{3i}^2}{(\lambda_0 + s_i) \cdot \sin(\gamma - \delta)}$$

При повороті на кут γ рівняння (5)

$$\lambda_2 \times \cos(\delta - \gamma) \times \omega_{2i}^2 + \lambda_2 \times \sin(\delta - \gamma) \times \varepsilon_{2i} + \cos(\varphi - \gamma) + c_k \times \cos(\gamma - \gamma) \times [S_i / \varphi_{\text{нх}}^2] -$$

$$- b_k \times \sin(\gamma - \gamma) \times \omega_{3i} \times [S_i / \varphi_{\text{нх}}] = (\lambda_0 + s_i) \times \cos(\gamma - \gamma) \times \omega_{3i}^2 + (\lambda_0 + s_i) \times \sin(\gamma - \gamma) \times \varepsilon_{3i}$$

Кутове прискорення шатуна

$$\varepsilon_{2i} = \frac{\cos(\varphi - \gamma) + \lambda_2 \cos(\delta - \gamma) \omega_{2i}^2 + c_k [S_i / \varphi_{\text{нх}}^2] - (\lambda_0 - s_i) \omega_{3i}^2}{\lambda_2 \cdot \sin(\gamma - \delta)}$$

Для з'ясування рівня і параметрів відмінності кінематичних характеристик коромисла ШЧЛ від заданого ЗПР розроблено програму на мові програмування *AutoLISP* моделювання руху ланок модернізованого ШЧЛ у середовищі *AutoCAD* як частина комплексного автоматизованого аналізу і синтезу подібних механізмів [7]. Програма побудована за модульним принципом.

Діалогове вікно програми (рис. 2) створено із застосуванням об'єктно-орієнтованої системи *OpenDCLStudio*.

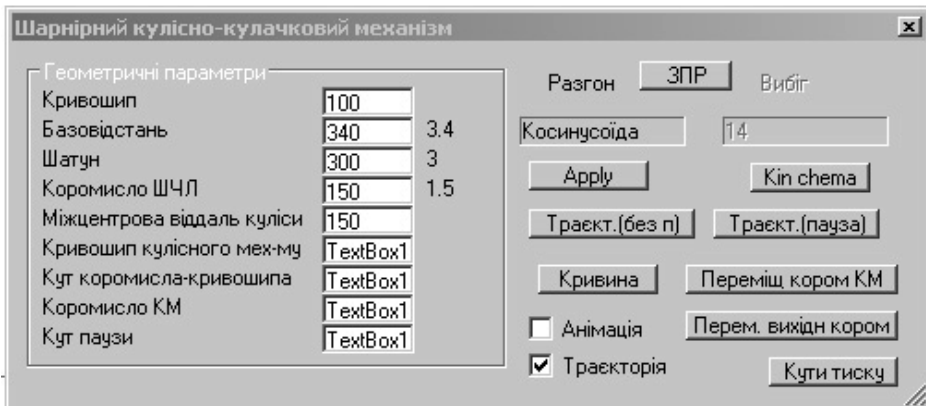


Рис. 2. Вікно введення початкових параметрів механізму

У цій системі були створені модулі і задано розташування компонентів управління на формі. Стандартна функція обробки замінена функцією присвоєння нових значень змінним параметрів механізму. Ідентифікація нових значень у відповідних мітках проводиться функціями, аналогічними до вже прописаних в обробнику ініціалізації. Враховуючи той чинник, що подібна ідентифікація проводитиметься при натисненні кожної з кнопок вибору варі-

антів, усі функції ідентифікації зводяться в окрему спеціалізовану функцію. Створений файл *LISP* завантажується у середовищі *AutoCAD* і запускається в роботу визначеною користувачем командою.

Інші модулі програми відповідають за послідовну побудову плоскої схеми та твердотільної моделі запропонованого механізму (рис. 3). Завдяки розробленій програмі у процесі моделювання ШЧЛ послідовно будуються ланки кінематичної моделі механізму. Ланки переміщуються при повороті кривошипа за умови збереження відповідних кінематичних зв'язків. Одночасно відстежуються положення кривошипа (кут φ), коромисла BO_2 базового ШЧЛ, можливе положення O_2C коромисла модернізованого ШЧЛ згідно з заданим користувачем ЗПР (кут γ_2) та будується профіль нерухомого кулачка-програмоносія.

```
(defun c:sddr () ;| побудова початкової кінематичної схеми механізму |;
  (If (/= shem_left nil) (command "Erase" shmech_pn rect_sl shem_left rect_sl_left ""))
  (If (/= ind_shem 1) (progn
    (setvar "DonutId" 4.0) (setvar "DonutOd" 6.0)
    (setvar "CmdEcho" 0) (setvar "LtScale" 10)
    (command "Donut" "" "" pckr pckor "") ;| шарніри в опорах |;
    (ax pckr 10) (ax pckor 10) ;| осі в шарнірах |;
    (setvar "CLayer" "Осьові") ;| база і траєкторія кривошипа |;
    (command "line" pckr pckor "") (command "Circle" pckr Lkr)
    (setvar "DonutId" 1.0) (setvar "DonutOd" 2.0) ;| шарніри у важелях |; ))
  (setvar "CLayer" "Розміри") (setvar "CeColor" "ByLayer")
  (setq shmech_pn nil ind_shem 1) (mech_pn fi_bg) ;| механізм у крайн. правому |;
  (setq dl_0 dlk1)
  (setvar "CeColor" "Magenta") (command "Donut" "" "" pak1 pbk1 "") (command "Zoom" "e")
  ;| Вихідні параметри для поточних розрахунків |;
  (setq fi_kr fi_bg dlt_fi (/ pi 72.0) ;| 2.5 gr |; ind_tr_pz 1)
  (setvar "CLayer" "0") (setvar "CeColor" "ByLayer") (command "Ucs" "s" "ucs0")
  ;| Підготовка масивів збереження розрахункових даних |;
  (setq l_sl nil l_s2 nil l_vl nil l_wl nil lst_pke nil Ind_graf 0
    l_sl (cons 0 l_sl))
  (dcl_Control_SetEnabled Fb1_Sskm_Forml_TextButton5 T) )
```

Рис. 3. Вікно програмного середовища VisualLISP з частиною коду програми розрахунку запропонованого механізму

При проведенні параметричних досліджень при незмінних геометричних параметрах ШЧЛ досліджувалася можливість застосування різних ЗПР, за якими мало б рухатися ведене коромисло механізму (рис. 4). Відомо, що більшість вихідних ЗПР належать до таких типів: гармонійні, циклоїдальні і полідинамічні. Тому при комп'ютерному моделюванні за інших однакових умов для корекції руху коромисла задавалися ЗПР різних типів і груп у межах одного типу. При моделюванні був прийнятий заданим наперед кутовий розмах веденого коромисла.

Як свідчать отримані графічні залежності (рис. 4), при зміні ЗПР у межах групи (ЗПР «0000» і «К»), згідно з класифікацією К. В. Тіра зміни в русі коромисла відрізняються незначно. Коромисло базового ШЧМ упродовж робочої частини циклу відстає від модернізованого (відповідно, на 8,32° та 13,8%), а протягом зворотного ходу — випереджає його (на 3,16° або 5,2%).

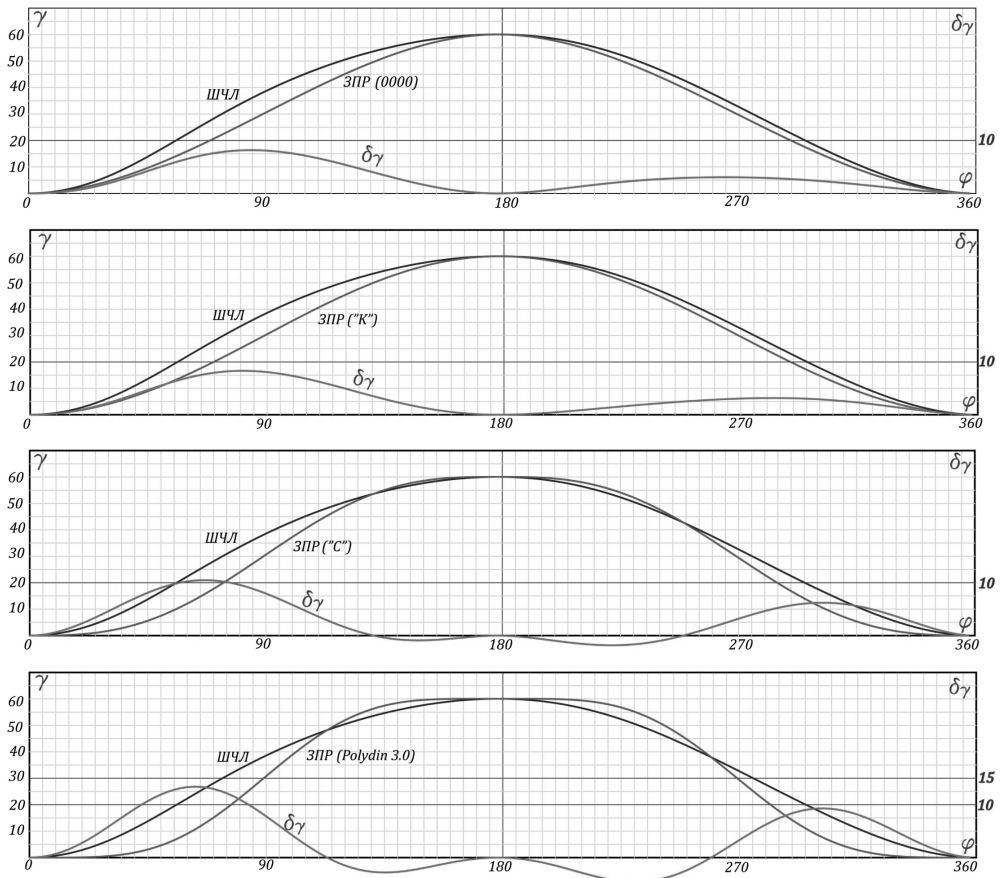


Рис. 4. Графічні залежності для різних ЗПР, отримані у результаті роботи програми

При застосуванні ЗПР циклоїдального (ЗПР «С» і «Шуна») або полідинамічного (ЗПР «Pd 3.0» і «Pd 3.7») типу коромисло протягом робочого і зворотного ходів спочатку відстає від коромисла, а потім випереджує його. При цьому зростає максимальне кутове відставання. Для циклоїдальних ЗПР «С» (максимум на $10,47^\circ$ або $17,4\%$), а для полідинамічних ЗПР «Pd 3.0» (максимум на $13,4^\circ$ або $22,3\%$).

Отже, застосування запропонованого механізму зі змінною довжиною веденої ланки збільшить продуктивність виконавчих механізмів поліграфічних і пакувальних машин без збільшення інерційних навантажень. Проаналізовано особливості геометрії і кінематики кулачково-важільного контуру цього механізму.

Запропоновано методику та програмне забезпечення для проведення аналітичних розрахунків кінематики механізму. Проведені дослідження дали змогу визначити оптимальні параметри конструкції та розробити рекомендації

із конструювання промислового обладнання. На основі цих досліджень вироблено рекомендації щодо проектування модернізованих ШЧМ зі змінною довжиною веденого коромисла для конкретного обладнання.

1. Артоболевский И. И. Синтез плоских механизмов / И. И. Артоболевский, Н. И. Левитский, С. А. Черкудинов. — М. : Физматгиз, 1959. — 1084 с. 2. Коломієць А. Б., Удосконалення пристроїв подачі аркушевих матеріалів програмованим коректуванням законів руху / А. Б. Коломієць, Я. М. Угрин, Я. Б. Стеців // Технологічні комплекси. — № 1, 2 (5, 6). — 2012. — С. 127–131. 3. Пальчевський Б. О. Розрахунок функціональних пристроїв пакувальних машин: навч. посіб. / Б. О. Пальчевський, О. А. Крестьянполь, Д. В. Бондарчук. — Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2011. — 296 с. 4. Пасіка В. Р. Теоретичні основи синтезу комбінованих механізмів зі змінною довжиною вхідної ланки на базі вихідних важільних і мальтійських механізмів: дис. ... д-ра техн. наук / В. Р. Пасіка. — Львів, 2011. — 320 с. 5. Пат. 103240 Україна. МПК В65В 41/00. В65Н 5/00. F16Н 21/00. Пристрій для переміщення плоских напівфабрикатів / О. М. Полюдов, І. І. Регей, А. Б. Коломієць, Я. Б. Стеців; заявник і патентовласник Укр. акад. друкарства. — № 201113964 ; заявл. 28.11.2011 ; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18. — 4 с. 6. Полюдов О. М. Розрахунки циклових механізмів поліграфічних і пакувальних машин на персональних комп'ютерах : навч. посіб. / О. М. Полюдов, В. О. Кузнецов, А. Б. Коломієць — Львів : Укр. акад. друкарства, 2004. — 96 с. 7. Стеців Я. Моделювання в САПР механізму шарнірного чотириланковика із змінною довжиною веденої ланки / Я. Стеців, В. Кузнецов, А. Коломієць // 3-я Міжнар. наук.-техн. конф. «Теорія і практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій». — Львів : КІНПАТРІ ЛТД, 2012. — С. 101–102. 8. Хведчин Ю. Й. Брошурувально-палітурне устаткування. Ч. 2 : Палітурне устаткування: підруч. / Ю. Й. Хведчин — Львів : Укр. акад. друкарства, 2007. — С. 180–181.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ШАРНИРНОГО ЧЕТЫРЁХЗВЕННИКА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ДЛИНОЙ ВЕДОМОГО ЗВЕНА

Для улучшения характеристик привода исполнительных механизмов полиграфических и упаковочных машин предлагается оригинальный механизм с изменяемой длиной ведомого звена. Выявляются особенности предложенного кулачкового-рычажного механизма. Подаются методика и программное обеспечение для проведения аналитических расчетов кинематики механизма. Проведенные исследования позволили определить оптимальные параметры конструкции и выработать рекомендации по конструированию промышленного оборудования.

ANALYTICAL RESEARCHES OF QUADRIC-CRANK MECHANISM WITH VARIABLE LENGTH OF SLAVE LINK

An original mechanism with variable length of slave link is offered for the improvement of characteristics of executive mechanisms' drive in printing and packing machines. There were found some features of the offered cam-and-lever mechanism. Methodology and software are offered for realization of analytical calculations of the mechanism kinematics. Undertaken studies allowed to define the optimal parameters of construction and to produce recommendations for the industrial equipment CAD.

Стаття надійшла 06.11.2014