

УДК 621.833

**Є. Хромов**

Доцент, канд. техн. наук

**І. Хромов**

Доцент, канд. техн. наук

**О. Хромов**

Аспірант

Севастопольський національний  
технічний університет,  
м. Севастополь

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СИСТЕМОТЕХНІКИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СТАЛЕКАНАТНОГО ВИРОБНИЦТВА**

*Створення нових зразків технологічних пристроїв для сталеканатного виробництва є одним з традиційних напрямів дослідницьких і дослідно-конструкторських робіт кафедри технічної механіки і машинознавства Севастопольського національного технічного університету. У статті описана структура і принципи побудови конфігураторів технологічних пристроїв як основа для практичної реалізації системної концепції проектування. Детально розглянуті моделі побудови конфігуратора для пристрою попередньої деформації елементів каната — преформатора. Показано, що застосування методів системотехніки відкриває додаткові можливості для ефективної модернізації обладнання сталеканатних заводів.*

**технологічний процес звивання, системне проектування, конфігуратор, преформатор**

Методи системного проектування (методи системотехніки) сьогодні використовують не лише при створенні складних систем керування, але й для розроблення нових технічних об'єктів різного призначення [1 — 3]. Згідно з [1] цим терміном позначається такий підхід до проектування, при якому поставлені задачі повинні розв'язуватися найефективнішим зі всіх можливих способом, і будь-який об'єкт розглядається як система, що включає безліч взаємозв'язаних елементів. Кожен елемент (складальна одиниця або деталь), у свою чергу, може розглядатися як система, а проєктований пристрій — як один з елементів ширшої системи.

Аналіз публікацій показує, що вживання методів системотехніки зберігає свою актуальність для різних сфер машинобудування, у тому числі при розв'язуванні задач модернізації технологічного обладнання канатних заводів.

Метою статті є створення конфігураторів для реалізації системної концепції проектування технологічних вузлів до машин для виробництва сталевих канатів.

В основу практичної реалізації системної концепції проектування закладено багатогранне відображення (моделювання) технічного об'єкта з використанням текстових, аналітичних, цифрових, графічних засобів накопичення, оброблення й розвитку інформації. Набір моделей, потрібних для адекватного опису вмісту (властивостей) об'єкта, його внутрішніх зв'язків і зв'язків з довкіллям, називають конфігуратором [2, 3]. Особливість побудови конфігураторів технологічного обладнання полягає у потребі моделювати не лише сам пристрій, але й технологічний процес, що реалізується за допомогою цього пристрою. У цій статті наведена структура і принципи побудови подібних конфігураторів на прикладі

одного з основних технологічних вузлів канатозвивальної машини, який називається преформатором.

Сталевим канатом є безліч спіралеподібних дротів або пасм, навитих на загальний циліндровий сердечник. Важливим показником якості, що впливає на довговічність каната, є міра попередньої деформації гнуття його елементів  $\psi = D_c / D$  ( $D_c$  — діаметр циліндра, описаного навколо вільного спіралеподібного елемента, виплетеного з каната;  $D$  — діаметр циліндра, описаного навколо спіралеподібного елемента, що знаходиться в канаті). Для забезпечення заданих значень діаметра спіралеподібних елементів  $D_c$  та показника  $\psi$  застосовують спеціальні пристрої — преформатори [4]. Створення нових зразків преформаторів є одним з традиційних напрямів дослідницьких і дослідно-конструкторських робіт кафедри технічної механіки і машинознавства Севастопольського національного технічного університету. Результати робіт стали основою для побудови конфігуратора, що включає десять базових моделей: функціональна модель відображає призначення і структуру преформатора, а також робочий простір для розміщення преформатора на конкретній канатозвивальній машині; кінематична модель відображає мінімальний набір рухів робочих елементів преформатора й заготовки, потрібних для реалізації функціональної моделі; аналітична модель технологічного процесу, що реалізується в преформаторі, включає набір математичних співвідношень, що описують взаємозв'язок регульованих параметрів налаштування з внутрішніми силовими чинниками і параметрами деформації сталевих заготовок; цифрова модель процесу відображає кількісний зв'язок параметрів налаштування з геометричними й механічними характеристиками запланованого до виробництва переліку канатів; динамічна модель коливань технологічного натягу стрижневих заготовок описує вплив живильного пристрою канатозвивальної машини на роботу преформатора; 3D-модель преформатора — це комп'ютерне просторове зображення преформатора у зібраному вигляді та всіх його елементів окремо; силова модель пристрою відображає величину й характер розподілу сил, що діють між окремими деталями преформатора й усередині несучих елементів; ресурсна модель розглядає процеси руйнування робочих органів і підшипникових опор преформатора; технологічна модель відображає преформатор за допомогою пакету робочих креслень і текстової документації, потрібних для його виготовлення; експлуатаційна модель розглядає преформатор як частину загальної виробничої системи: оператор — заготовки — звиваюча машина — преформатор — готовий канат.

Розглянемо детально структуру та склад окремих моделей конфігуратора.

**Функціональна модель.** Функціональна модель преформатора включає загальну схему (рис. 1) і об'ємну структурну схему з прив'язкою до ротора конкретної канатозвивальної машини (рис. 2). З рис. 1 видно, що пристрій призначений для реалізації синхронної пружно-пластичної формозміни декількох довгомірних заготовок, тобто спершу прямолінійна вісь кожної заготовки на виході з преформатора набуває форми гвинтової лінії із заданими параметрами  $H$ ,  $D_c$  (крок і зовнішній діаметр спіралеподібного елемента). Вказана технологічна

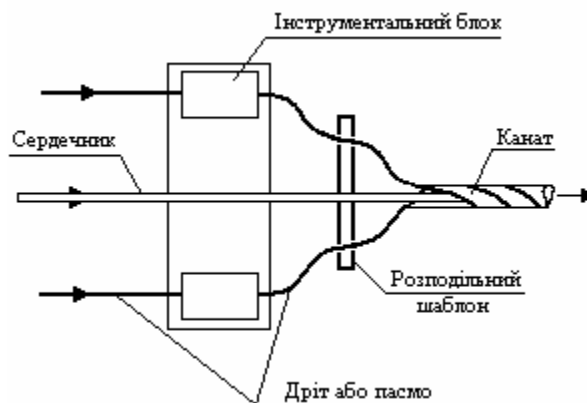


Рис. 1. Загальна функціональна схема преформатора

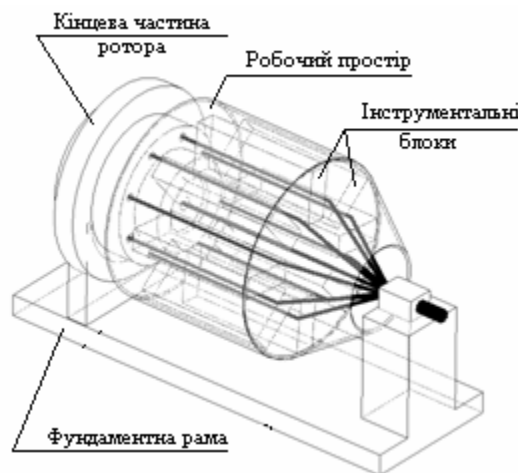


Рис. 2. Об'ємна структурна схема преформатора для одного з варіантів каната і звиваючої машини

операція виконується перед укладанням гвинтових елементів на осердя (перед конусом звивання). З аналізу загальної схеми виходить, що преформатор повинен включати набір (за кількістю звиваних елементів) однакових інструментальних блоків, розташованих симетрично відносно осі каната, що звивається.

При цьому кожен інструментальний блок повинен забезпечувати можливість плавного регулювання параметрів гвинтової осі заготовки у заданому діапазоні.

Друга частина функціональної моделі включає комп'ютерну об'ємну структурну схему преформатора, в якій відображені: кінцева частина ротора заданої канатозвивальної машини (місце кріплення преформатора), фундаментна рама машини й робочий простір для розміщення проектного об'єкта (рис. 2).

На підставі об'ємної схеми при заданій кількості елементів каната визначають гранично допустимі розміри робочого простору для окремого інструментального блока. Основне завдання, яке вирішувалося при розробленні описаної моделі, полягало у створенні бази даних 3D-структурних схем для звиваючих машин і типів сталевих канатів, що випускаються на вітчизняних заводах.

**Кінематична модель.** Ця модель преформатора графічно подана схемою на рис. 3. Кожен інструментальний блок преформатора (умовно показаний лише один блок) виконаний у вигляді трьох роликів, встановлених з можливістю обертання навколо паралельних осей на загальній основі (касетна конструкція).

Заготовка, яка спочатку є прямолінійною, подається з живильної котушки канатної машини, проходить через систему трьох робочих органів і поступає в зону звивання. За рахунок примусового навивання на сердечник і обертання живильної котушки заготовка здійснює гвинтовий рух відносно робочих роликів, піддається пружно-пластичному згину й на виході набуває спіралеподібної форми. Для забезпечення регулювання вихідних параметрів спіралі два крайні ролики мають бути встановлені з можливістю відносного переміщення  $\Delta_1$ , а центральний ролик — з можливістю вертикального переміщення  $\Delta_2$  відносно крайніх роликів. Загалом можливі й інші варіанти кінематичної моделі [4], розгляд яких виходить за рамки цієї статті.

**Аналітична модель процесу формозміни заготовки.** Вона реалізується в преформаторі й побудована на основі понять і рівнянь механіки пружно-пластичного стрижня. Розрахункова схема і діаграми дослідженого процесу подані на рис. 4. У першому наближенні можна вважати, що заготовка сприймає деформацію чистого згину (рис. 4,а). Базовими геометричними параметрами проєктованого інструментального блока є: робочий діаметр роликів преформатора  $D_p$ , міжцентрова віддаль крайніх роликів по горизонталі  $A_G$ , міжцентрова віддаль роликів по вертикалі  $A_B$ . Для визначення цих параметрів потрібна система рівнянь, що встановлює зв'язок характеристик процесу преформації з геометричними й механічними властивостями заготовки.

Вихідним пунктом для моделювання процесу гнуття є залежність внутрішнього моменту гнуття від кривини дроту  $M(k)$ . У загальному випадку ця залежність є неоднозначною. Це показано графічно на рис. 4,б. Тут процес пружно-пластичного навантажування дроту в зоні центрального ролика (лінія 0 — 1) описується нелінійною інтегральною функцією

$$M(k) = \int_F \sigma(d, E, \sigma_B, k, y) y dF, \quad (1)$$

а процес пружного розвантажування на виході з преформатора (лінія 1 — 2) — лінійною функцією

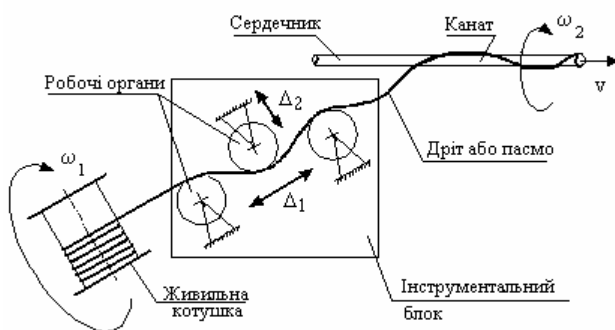


Рис. 3. Схема кінематичної моделі преформатора

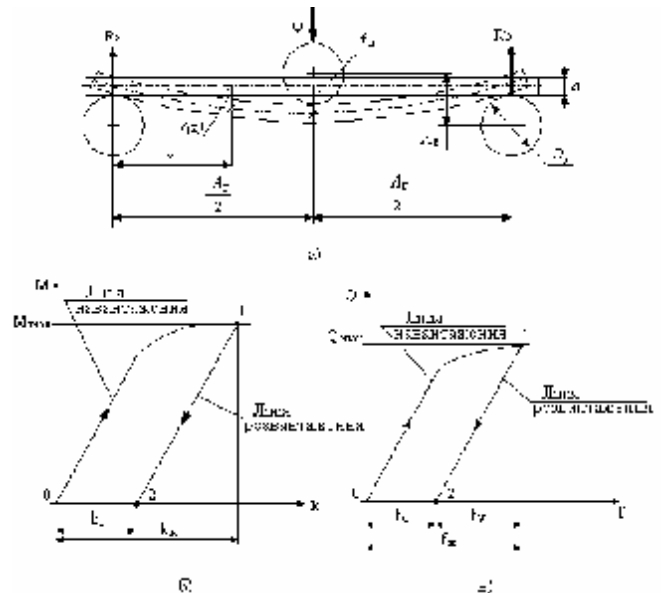


Рис. 4. Схема процесу деформації заготовки

$M = EI(k - k_c)$  (де:  $d, E, \sigma_B, I$  — діаметр, модуль пружності, межа міцності й осевий момент інерції дроту;  $k_c$  — задане значення залишкової кривини готової спіралі).

Інтегральну залежність (1) можна записати в явній формі на основі вибору конкретного вигляду апроксимуючої функції  $\sigma(\epsilon)$ , що описує експериментальну діаграму розтягу сталевго дроту. Залежно від вимог до точності розрахунків використовують лінійну або нелінійну функції [5]. Після цього можна записати рівняння для визначення потрібної початкової кривини гнуття дроту  $k_n$  у преформаторі за заданою залишковою кривизною дроту на виході  $k_c$ :

$$M_{max} = \int_F \sigma(d, E, \sigma_B, k_n, y) y dF = EI(k_n - k_c). \quad (2)$$

Далі, при заданому переліку оброблюваних канатів можна отримати нерівність для вибору діаметра робочих роликів преформатора  $D_p \leq 2/(k_n)_{max}$ :

Міжцентрова віддаль по горизонталі для двох крайніх роликів залежить від кроку звивання каната  $H$  і призначена з досвідних міркувань у діапазоні  $A_G = (0,8 \div 1,3)H$ . Для вертикальної міжцентрової віддалі  $A_B$  з аналізу схеми на рис. 4,а можна отримати просту формулу:

$$A_B = D_p + d - f_H, \quad (3)$$

де  $f_H$  — невідомий початковий прогин дроту в зоні центрального ролика.

Розрахунок прогину  $f_H$  є найскладнішою частиною аналітичної моделі. Тут на підставі (1) потрібно отримати зворотну залежність:

$$k = k(d, E, \sigma_B, M) = k\left(d, E, \sigma_B, \frac{Qz}{2}\right),$$

де  $M = Qz/2$  — внутрішній момент гнуття у довільному перерізі дроту з координатою  $z$ ;  $Q$  — поперечна сила

на центральному ролику. Зігнута вісь дроту описується диференціальним рівнянням

$$k = \frac{d^2V}{dz^2} = k \left( d, E, \sigma_B, \frac{Qz}{2} \right). \quad (4)$$

Розв'язуючи це рівняння за граничних умов  $V(0) = V(A_T) = 0$ , можна отримати функцію для прогину дроту в зоні центрального ролика  $f = V(A_T/2) = f(d, E, \sigma_B, Q, A_T)$  та зворотню функцію для поперечної сили  $Q(d, E, \sigma_B, A_T, f)$ . Остання функція описує лінію навантаження 0 — 1 на діаграмі (рис. 4, в). Лінія пружного розвантаження 1 — 2 описується лінійною функцією, де  $Q = G(f - f_0)$  — коефіцієнт жорсткості дроту при пружній деформації гнуття.

Таким чином, можна записати рівняння для розрахунку початкового прогину  $f_H$  за заданою величиною залишкового прогину  $f_0$ :

$$Q_{max} = Q(d, E, \sigma_B, A_T, f_H) = G(f_H - f_0) \quad (5)$$

Формули і рівняння (1) — (5) відображають загальну схему, на підставі якої і була розроблена детальна аналітична модель розглянутого процесу з використанням останніх досягнень механіки пружно-пластичного стрижня [5, 6]. Зважаючи на складність такої моделі не можна безпосередньо використати для виконання проектних розрахунків. Потрібен ще один етап моделювання.

**Цифрова (комп'ютерна) модель технологічного процесу.** Це сукупність алгоритмів, що відображують аналітичну модель в електронній пам'яті комп'ютера. Для реалізації цифрової моделі розроблена спеціальна програма «Преформація» на базі операційного середовища сімейства Windows. Фрагмент призначеного для користувача інтерфейсу програми показаний на рис. 5. Після введення інформації про геометричні й механічні характеристики запланованого до виробництва каната проєктувальник автоматично отримує потрібні значення параметрів інструментального блока  $D_p, A_B, A_T$ . Розширена версія програми дає змогу розраховувати також сили взаємодії заготовки з робочими органами преформатора

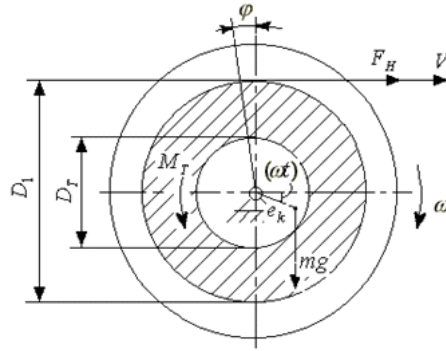


Рис. 6. Розрахункова схема динамічної моделі

і витяжним механізмом звивальної машини. На підставі численних натурних експериментів встановлено, що похибка, отриманих за допомогою створеної моделі розрахункових даних, не перевищує 5 — 20 %.

**Динамічна модель коливань технологічного натягу заготовки.** Мрдель дає можливість досліджувати взаємодію елементів підсистеми: живильна котушка — стрижньова заготовка — преформатор — розподільний шаблон канатозвивальної машини. Для побудови моделі використовуються розрахункова схема згідно з рис. 6 і нелінійне диференціальне рівняння крутильних коливань живильної котушки біля положення статичної рівноваги:

$$J\ddot{\varphi} = -F_H \frac{D_1}{2} + M_T + M_e, \quad (6)$$

де  $F_H = F_H(c, \varphi, e_u, \omega_1)$  — технологічний натяг, який залежить від жорсткості  $c$  стрижневої заготовки, від кутової координати  $\varphi$  котушки, від ексцентриситету  $e_u$  і кутової швидкості  $\omega_1$  розподільного шаблону звиваючої машини;  $D_1$  — діаметр змотування заготовки з котушки;  $M_T(\omega)$  — гальмівний момент, що залежить від кутової швидкості  $\omega$  живильної котушки;  $M_e(e_k)$  — момент, що залежить від ексцентриситету центра мас котушки  $e_k$ .

Числове розв'язування рівняння (6) з використанням відомих математичних програмних пакетів дає змогу досліджувати можливий діапазон зміни амплітуди коливань технологічного натягу при різних режимах роботи звиваючої машини, а також розробляти заходи щодо зниження рівня коливань [7].

**3D-модель преформатора.** Модель створюється за допомогою засобів комп'ютерної графіки і забезпечує максимально досягну ефективність проектних робіт. Преформатор відображується тут як просторова система, що складається з багатьох з'єднаних між собою деталей (рис. 7).

При створенні 3D-моделі вирішується багатоцільове завдання пошуку такої комбінації деталей, геометрична форма і способи з'єднання яких дають змогу реалізувати всі вимоги функціональної, кінематичної і цифрової моделей. Окрім цього, слід забезпечити оптимальне співвідношення показників міцності, довговічності і майбутніх витрат на виготовлення виробу. Алгоритм побудови моделі заснований на використанні методу послідовних наближень і не піддається строгому опису. Іншими словами, 3D-модель, порівняно з попередніми, не може

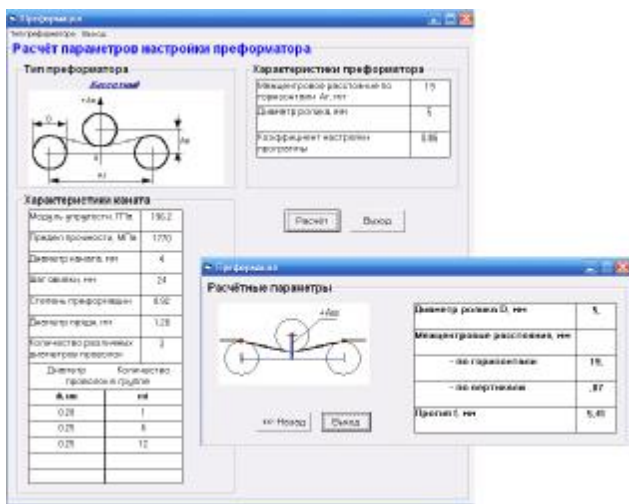


Рис. 5. Фрагмент інтерфейсу програми «Преформація»

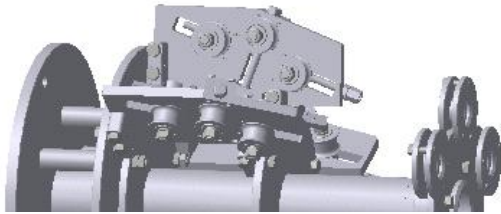


Рис. 7. Фрагмент 3D-моделі шестикасєтного преформатора з робочим діаметром ролика 36 мм

розглядатися як деякий універсальний інструмент, придатний для автоматичного виконання проекту з будь-якими вихідними даними. Зважаючи на різноманіття типорозмірів сталевих канатів і звивальних машин, такий вигляд моделі, по суті, є графічною базою даних, яка постійно поповнюється. Особливість цієї бази полягає в тому, що вона не може мати широкого поширення, носить унікальний характер і створюється у вузькому колі розробників.

**Силовa модель пристрою.** Ця модель відображає величину й характер розподілу сил, що діють на межах між окремими елементами преформатора і всередині несучих елементів. Як вихідні силові параметри використовуються результати попередніх етапів динамічного розрахунку коливань натягу й цифрового моделювання процесу взаємодії заготовки з робочими органами преформатора. Крім цього, преформатор досліджується тут як частина загальнішої системи — канатозвивальної машини. Це означає, що за рахунок обертання разом з ротором канатної машини, несучі елементи преформатора піддаються дії великих відцентрових сил. Для аналізу напружено-деформованого стану використовується метод скінчених елементів і спеціальні прикладні програми [8]. На цій стадії успішно застосовується графічна база даних, що створюється у процесі попереднього етапу 3D-моделювання. Результати силового аналізу подаються у вигляді плоских або об'ємних схем розподілу напружень і є основою для ухвалення рішення про потребу коректувати 3D-моделі преформатора.

**Ресурсна модель.** Вона дає змогу виконати оцінювання міжремонтного періоду експлуатації преформатора з врахуванням процесів втомного руйнування робочих органів і підшипникових опор інструментального блока. На цій стадії використовуються результати попередніх етапів моделювання, стандартні методики розрахунку довговічності підшипників, а також матеріали спеціальних експериментальних досліджень, виконаних у лабораторії СевНТУ [9].

**Технологічна модель.** Модель зображає преформатор у вигляді пакета робочих креслень і текстової документації, потрібних для його виготовлення. На сьогоднішній день ця модель, як і розглянута вище 3D-модель преформатора, є широкою комп'ютерною базою даних.

**Експлуатаційна модель.** Ця модель розглядає преформатор, як частину ширшої системи (виробничої одиниці): оператор — заготовка — звивальна машина — преформатор — канат. В основі моделювання лежить інформація про параметри і технічний стан конкретної

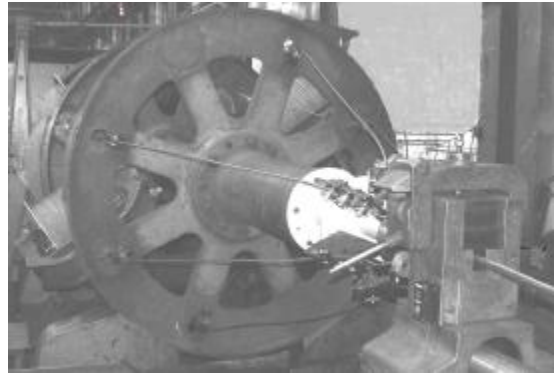


Рис. 8. Промислові випробування шестикасєтного преформатора на канатній машині корзинного типу



Рис. 9. Промислові випробування двосекційного рихтувальника при виготовленні спірального каната

виробничої одиниці. Завданням моделювання є формування переліку вимог до окремих елементів системи, при виконанні яких технологічний вузол, що поставляється, забезпечує виготовлення каната з гарантованими показниками рівня преформації.

Описана сукупність взаємозв'язаних моделей утворює конфігуратор преформатора. Аналогічні конфігуратори створені також для проектування інших технологічних вузлів до канатозвивальних машин: живильний пристрій (каретка), рихтувач, торсіон та ін. [10, 11]. На цій основі розпочата реалізація системної концепції проектування нових зразків обладнання (рис. 8, рис. 9). Успішно виконано декілька замовлень для різних підприємств сталеканатного виробництва.

**Висновок.** Використання системної концепції проектування відкриває додаткові можливості щодо створення високотехнологічних вузлів і ефективної модернізації обладнання канатних заводів.

Розроблені конфігуратори і породжені з їх використанням бази даних у перспективі можуть удосконалюватися, розширюватися і трансформуватися в базу знань для пошуку нових рішень проблемних питань технології виробництва сталевих канатів. Це і є предметом подальшої роботи у вказаному напрямі.

## Література

1. Гуд Г.Х. Системотехника / Г.Х. Гуд, Р.Э. Маккол. – М.: Советское радио, 1962. – 256 с.
2. Фролов К.В. Системная концепция и алгоритмы проектирования механизмов произвольной структуры / К.В. Фролов, В.П. Прохоров // Труды Всемирного

Конгресса по ТММ. – Оулу, Финляндия, 1999. – Т.2. – С. 689-694.

3. Прохорова Н.И. Модель конфигуратора приводов с винтовым движением / Н.И. Прохорова, В.П. Прохоров // Материалы международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем и элементов их конструкций». – Севастополь, изд-во СевНТУ, 2008. – С. 404 – 409.

4. Букштейн М.А. Производство и использование стальных канатов / М.А. Букштейн. – М.: Металлургия, 1973. – 360 с.

5. Хромов В.Г. Механика процесса холодной упруго-пластической деформации стержня: учеб. пособие / В.Г. Хромов. – К.: УМК ВО, 1990. – 50 с.

6. Хромов И.В. Технологическая механика стальных канатов. Практическое применение. Пути развития / И.В. Хромов // Материалы международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем и элементов их конструкций». – Севастополь, изд-во СевНТУ, 2008. – С. 259 – 263.

7. Хромов Е.В. Компьютерный анализ процесса колебаний технологического натяжения элементов каната при свивке / Е.В. Хромов, О.В. Хромов // Стальные канаты. Сборник научных трудов. Вып. 6 – Одесса: Астропринт, 2008. – С. 202 – 208.

8. Хромов В.Г. Применение метода конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния элементов скоростного технологического оборудования / В.Г.Хромов, В.В.Леонтьев // Тезисы докладов межотраслевой научно-технической конференции «Расчет

и конструирование элементов подъемно-транспортного оборудования». – Севастополь, 1993. – С. 12.

9. Прошкин Э.В. Экспериментальные исследования ресурса многоопорных рабочих органов малогабаритных преформаторов / Э.В. Прошкин, В.Г.Хромов, В.В. Горяинов // Вестник СевГТУ: сб. науч. тр. – Севастополь, 1977. – Вып. 8 – С. 124 – 126.

10. Хромов О.В. Проектирование элементов каретки канатовьющей машины в системе КОМПАС-3D / О.В. Хромов, Е.В. Хромов // Материалы международной научно-технической конференции «Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта». – Севастополь, изд-во СевНТУ, 2007. – С. 73 – 74.

11. Хромов И.В. Программные пакеты для автоматизированного проектирования процессов изготовления многопроволочных витых изделий / И.В. Хромов // Метиз. – 2008. – № 6 (37) – С. 12-15.

Отримана 28.06.09

*E. Khromov, I. Khromov, O. Khromov*

**Application of system engineering methods for designing technological equipment in a steel rope manufacturing**

*Sevastopol National Technical University, Sevastopol*

*Making of new patterns of technological devices for a steel rope manufacturing is one of the traditional research areas and development works of the Department of Technical Mechanics and Science of Machines of the Sevastopol National Technical University. The paper deals with a structure and construction principles of product configurators, which is the basis for practical realization of system conception of design. Models of the configurator construction have been considered in detail for device of prestrain of rope elements called preformator. It is shown that application of the system engineering methods gives the additional opportunities for effective modernization of the equipment of a steel rope works.*

21 01 01 003y

## XVI INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS

May 24 — 28, 2010

Riga, Latvia

The present Conference follows the previous meetings in this series held in Riga from 1965 to 2008. The XVI International Conference intends to keep the customary themes of discussion. Traditionally on the Riga conferences, the number of participants is approximately 250 from many countries. So, the conference offers a good opportunity to meet colleagues from all over the world. The meeting history is available on the Conference website.

### CONFERENCE SCIENTIFIC SECRETARY:

**Dr. K. Cirule, Institute of Polymer Mechanics,  
University of Latvia**

23 Aizkraukles St., Riga, LV 1006, Latvia

phone: +371-67543121,

mob. phone: +371-29662710,

fax: +371-67820467;

e-mail: [cirule@pmi.lv](mailto:cirule@pmi.lv)

<http://www.pmi.lv/html/ConfInf.htm>.