

УДК 621.3

Є.А. Дружинін, С.М. Смаль

*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків*

**СИСТЕМНІ МОДЕЛІ ІНТЕГРАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ  
ТА ВИРОБНИЦТВА У РАЗІ ЗАСТОСУВАННЯ НАСКРІЗНОГО  
ПАРАЛЕЛЬНОГО ЦИКЛУ СТВОРЕННЯ ВИРОБУ**

*У роботі проведено аналіз існуючих циклів створення виробу. Розроблено логіко-алгоритмічну модель процесів створення складної техніки.*

*системні моделі інтеграції проектування, технологічної підготовки та виробництва, наскрізний паралельного цикл створення виробу*

**Вступ**

Успіх будь-якого машинобудівного підприємства в ринкових умовах визначається конкурентоспроможністю його продукції. Необхідно прагнути до скорочення циклу створення виробу. Це можливо

шляхом скорочення термінів проектування, технологічної підготовки і виробництва виробу, а також його контролю і сертифікації. Істотно скоротити терміни всієї технічної підготовки виробництва, підвищити якість виробів, що випускаються, і одержати можли-

вість швидкого освоєння нової продукції, дозволить перехід до методів наскрізного паралельного проектування і підготовки виробництва в циклі створення нового виробу.

Сутність методу наскрізного паралельного циклу створення виробу полягає в комплексному підході до рішення конструкторських, технологічних і виробничих задач з використанням інтегрованих САПР "високого рівня" [1 – 3]. Під комплексним підходом розуміють рішення наступних задач: концептуальний дизайн виробу; створення тривимірної моделі і підготовка креслень; інженерний аналіз і оптимізація характеристик виробу; проектування технологічного оснащення; створення керуючих програм для устаткування з ЧПК; виготовлення деталей і збирання виробу.

Тільки комплексний підхід до рішення конструкторських, технологічних і виробничих задач дозволить підприємству оперативно створювати і запускати у виробництво конкурентоспроможну продукцію. Наскрізне проектування – це коли виріб проходить усі стадії підготовки виробництва в єдиному інформаційному середовищі. Паралельне проектування – коли інженерні групи конструкторів, розраховувачів, технологів, нормувальників одночасно працюють над виробом – що істотно скорочує повний цикл його створення.

### Основна частина

Традиційно процес проектування, технологічної підготовки та виробництва можна представити у вигляді послідовного циклу (рис. 1, а). Класичне уявлення такого підходу пов'язано з необхідністю послідової передачі результатів проектних дій між всіма учасниками проекту. Реалізація такого циклу пов'язана з максимальним терміном його реалізації. Також слід відмітити, що в рамках такої реалізації створення виробу помилки або поява невідповідностей при реалізації проекту призводить до суттєвого збільшення циклу проектування за рахунок необхідності усунення невідповідностей шляхом повторення множини проектних дій. Наявність сучасних засобів автоматизації проектування та технологічної підготовки виробництва дає змогу створити єдиний інформаційний простір для паралельного виконання робіт по конструкторській та технологічній підготовці виробництва. Схема реалізації паралельного циклу виготовлення виробу за рахунок використання єдиного інформаційного простора, як основу реалізації можливостей паралельного виконання робіт в рамках повного наскрізного циклу представлена на рис. 1, б.

Для підвищення ефективності використання сучасних інформаційних технологій та засобів проектування необхідно створити інформаційне середовище, яке описує як структуру складної системи, що розробляється, так і процесів розробки, конструювання, технологічної підготовки та виробництва. Основу такого інформаційного середовища повинні складати комплекс формалізованих моделей. Найвищий рівень

узагальнення мають моделі, що створюються на основі системного аналізу процесів, структур і описуються засобами теоретико-множинного підходу.

#### 1. Системна модель циклу створення виробу.

Процес створення технічного виробу оснований на формулюванні цілей, властивостей, якими повинна володіти спроектована система, і обмежень здійснити синтез множини структур потенційно здатних реалізувати поставлену мету на всій множині можливих рішень (на множині універсуму  $U$ ). Теорія системного синтезу структур теоретично обґрунтована в роботах [4, 5]. Розглянемо формалізацію процесів проектування.

Перший процес – синтез цілей і їхніх моделей, формалізація властивостей і обмежень  $F_{ТТВ}$ ; другий процес – синтез принципів побудови  $S_{pr}$ ; третій – апроксимація  $A$  (створення необхідного вигляду, плану, характеристик предмета проектування); четвертий – синтез способів побудови  $S_t$ ; п'ятий – синтез структури  $S_{st}$ ; шостий і сьомий – відповідно синтез параметрів  $\Phi_k$  і допусків на них  $\Phi_n$ .

Представимо формально процес проектування у вигляді відображення  $\Pi$ , що має область визначення на множині значень технічних, технологічних, економічних і експлуатаційних вимог (ТТВ).  $\Pi$  має значення в множині структур  $K^*$ , у множині значень параметрів  $X^*$  їхніх елементів, припустимих по ТТВ, і в допусків  $d^*$  на технологічний розкид параметрів  $X^*$ . Відображення  $\Pi$  представимо композицією [5] проміжних відображень:

$$\Pi = \Phi_n \circ \Phi_k \circ S_{st} \circ A \circ S_{pr} \circ F_{ТТВ}. \quad (1)$$

Починають процес проектування з виконання відображення  $F_{ТТВ}$ , що описує процес поступової формалізації ТТВ для всіх наступних етапів, роблячи ТТВ усе більш детальними:

$$F_{ТТВ}: ТТВ \rightarrow \Phi_{op}, \quad \Phi_{op} = (\Phi_{op1}, \Phi_{op2}, \dots, \Phi_{op6}), \quad (2)$$

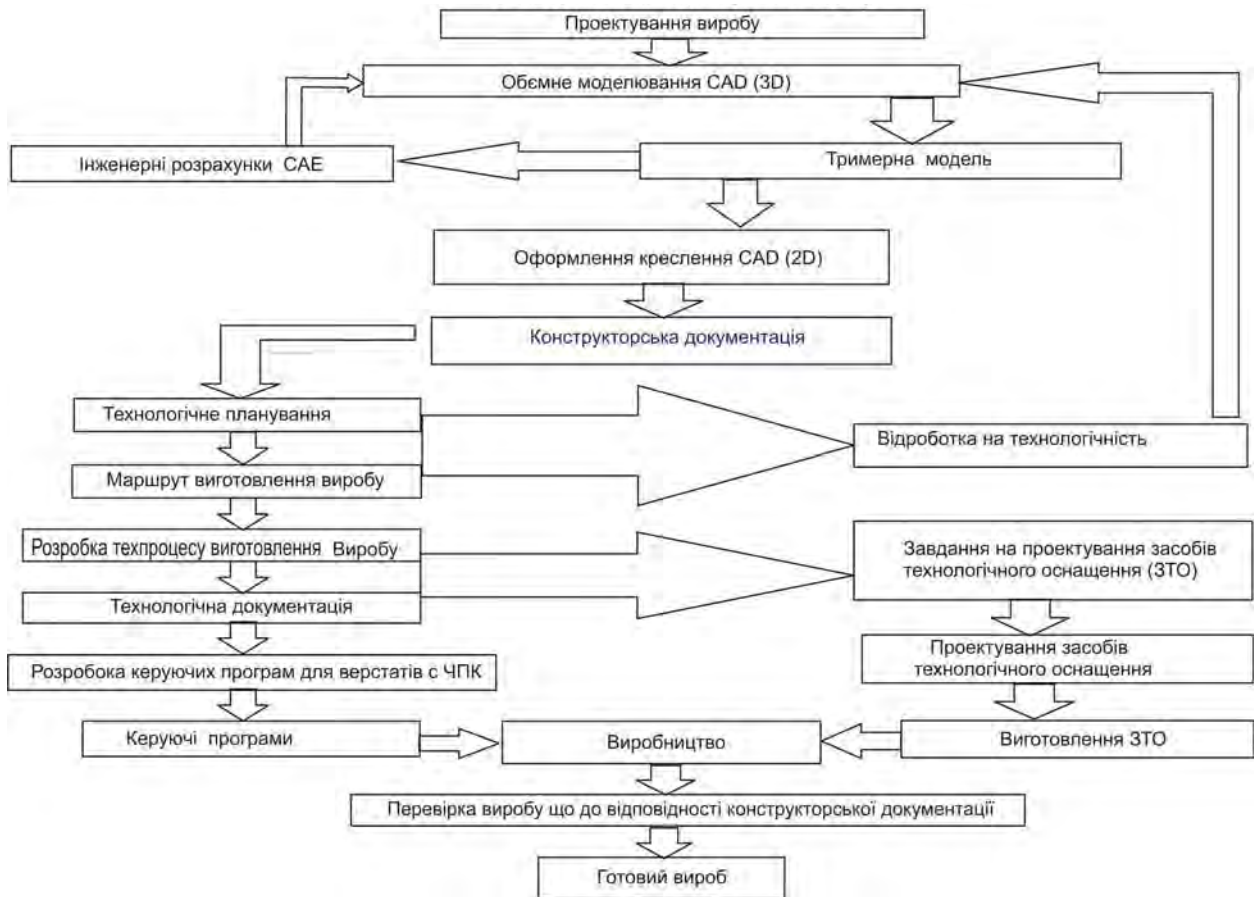
де  $\Phi_{opi}$  –  $i$ -та функція вибору в задачі прийняття рішення.

При цьому для кожного етапу формується принцип оптимальності ( $opi$ ), що відображає представлення проектувальника про якість спроектованої структури даного етапу. Ці принципи керують процесом синтезу і поступово виділяють із сукупності всіх можливих структур (з множини універсумів  $U$ ) підмножину меншої потужності.

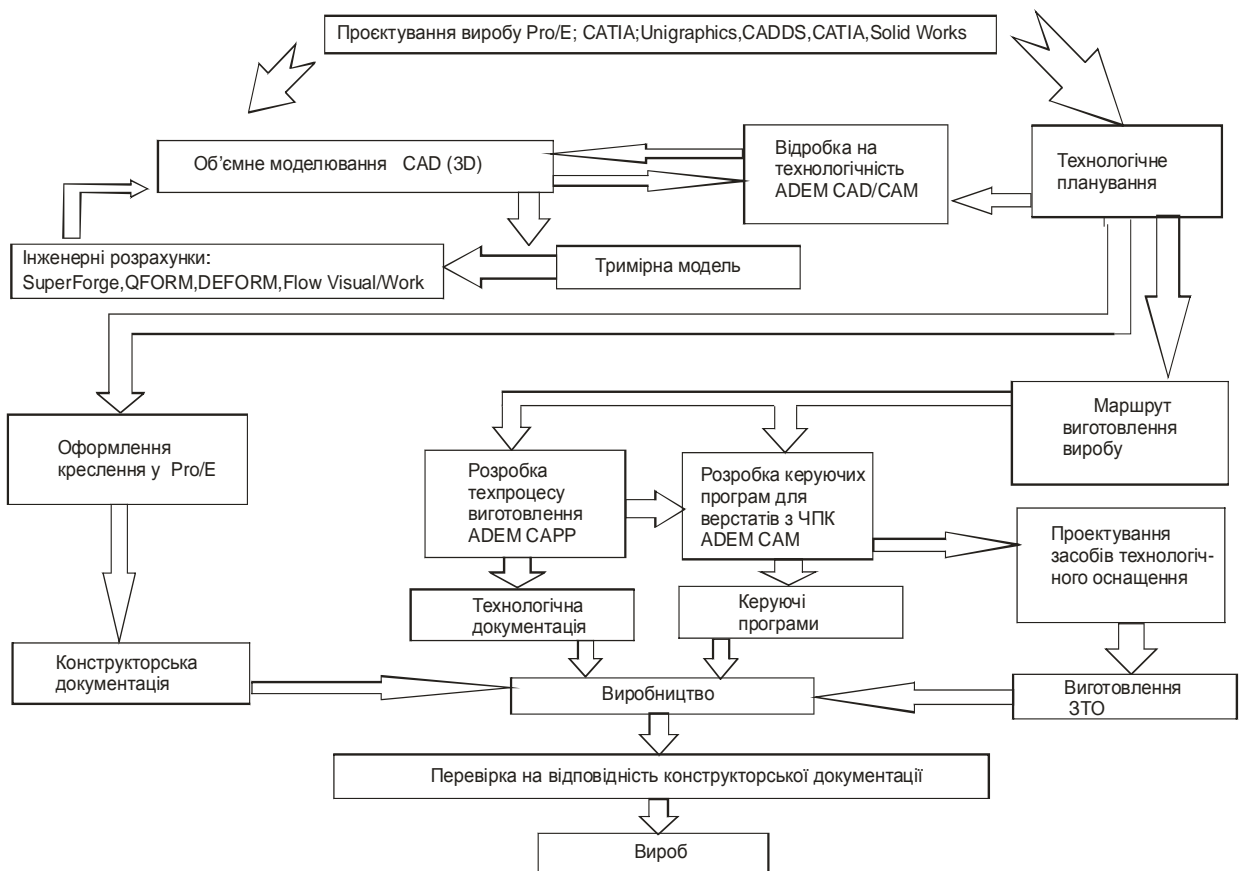
На наступному кроці реалізується відображення  $S_{pr}$  яке відповідає синтезу або вибору одного з відповідних принципів побудови  $pr$  спроектованої структури. Відображення має область визначення на множині ТТВ і універсальній множині структур  $K_U$ , а значення в множині версій структур  $K_{pr} \subseteq K_U$ , здатних реалізувати синтезований принцип. Синтез ведеться під керуванням функції вибору  $\Phi_{op1}$ , що є математичним вираженням принципу оптимальності  $op1$ :

$$S_{pr}: \Phi_{op1} \cap pr \rightarrow K_{pr}; \quad K_{pr} = \{K_{pri}\}. \quad (3)$$

Відображення  $A$  відповідає етапу формального опису виду об'єкта проектування, деяких його харак-



а – послідовний цикл утворення виробу



б – наскрізний паралельний цикл утворення виробу

Рис. 1. Існуючі цикли створення виробу

теристик чи параметрів. Для технічних систем також важливим є вибір бажаного виду характеристик і параметрів об'єкта. Такими засобами буде створена математична модель об'єкта проектування. Відображення має область визначення на множині значень  $K_{pr}$  і функції вибору  $\Phi_{op2}$ , що задає критерії оптимальної апроксимації і фізичної реалізованості на заданих у ТТВ обмеженнях і елементному базисі. У результаті рішення задачі  $\Phi_{op2}(K_{pr}, op2)$ , виділяють з множини  $K_{pr}$  підмножину версій структур  $K_A$ , а область значень у множині функцій заданого класу  $D(Z,p)$  (формальних описів виду всього об'єкта, якихось його частин, чи сторін характеристик)

$$A: \Phi_{op2} \cap K_{pr} \rightarrow D(Z,p), \quad (4)$$

де  $p$  – перемінна;  $Z$  – вектор коефіцієнтів.

Оператор синтезу способів побудови структур  $S_T$  виділяє з  $K_A$  підмножину  $K_{pr}$  структур, Вони реалізують не тільки синтезований принцип побудови, але і задовольняють заданим ТТВ –  $\Phi_{op3}$  і функції  $D(Z,p)$ , тобто

$$S_T: \Phi_{op3} \cap K_A \cap D(Z,p) \rightarrow K_{pr}, \quad (5)$$

де область значень є чю способів побудови структур  $K_{pr} = \{K_{pmj}\}, j = (1, 2, \dots, \mu)$ .

Спосіб побудови  $K_{pmj}$  – це те, що в патентній літературі називають способом, але на відміну від патенту, тут він повинний бути викладений не стільки вербально, скільки за допомогою алфавіту опису структур  $K_A$ , деяких параметрів функції  $D(Z,p)$  і ТТВ, що задають функції вибору  $\Phi_{op3}$ . Фактично це означає, що коефіцієнти  $Z$  представляються у виді деяких структур, аналіз яких за допомогою функції вибору  $\Phi_{op3}$  дозволяє вибрати ефективні.

Подальше зменшення потужності і  $K_{pr}$  досягається за допомогою структурного аналізу і виділення з і найбільш ефективного способу  $j$ , призначеного для наступної реалізації в процедурі синтезу  $S_{st}$  і можливих структур

$$S_{st}: \Phi_{op4} \cap D(Z,p) \cap K_{pmj} \rightarrow K_p. \quad (6)$$

Виконання цього відображення породжує еквівалентних, з погляду області значень  $S_{st}$ , структур  $K_p = \{K_{p1} K_{p2}, \dots, K_{pr}\}$ . Кожна з цих  $r$  структур описується функцією

$$K_i(p) = U_2(p)/U_1(p) = B(p)/A(p) = (b_0 + b_1 p_1 + \dots + b_m p_m) / (a_0 + a_1 p_1 + \dots + a_n p_n), \quad (7)$$

де  $U_1(p)$  і  $U_2(p)$  – вхідні і вихідні матеріальні потоки. Вид і порядок поліномів чисельника і знаменника функції (7) збігаються з відповідними коефіцієнтами поліномів функції (4).

Остання множина  $K_p$  разом з вихідними ТТВ є областю визначення відображення  $\Phi_k$ , що має область значень у і ефективних структур з оптимальними параметрами  $X^*$

$$\Phi_k: K_p \cap \Phi_{op5} \rightarrow K_p^*. \quad (8)$$

Проектування завершує етап визначення допусків на параметри елементів. Етап описується відображенням  $\Phi_n$ , що має область визначення на і  $X^*$  оптимальної структури, а область значень у і  $d_{\Sigma}^*$  чи

$$\Phi_n: K_p^* \cap \Phi_{op6} \rightarrow d_{\Sigma}^*. \quad (9)$$

Повна реалізація системного підходу здійснюється, якщо на кожному кроці процедури проектування породжується ефективних рішень, надаючи тим самим можливість проводити оптимізацію на наступних кроках синтезу.

Структура технічного виробу має складний, ієрархічний вид, який уточнюється на стадіях проектування та технологічного планування. При цьому, детально-складальну одиницю (ДСО) будь-якого рівня з позицій теоретико-множинного підходу можна формалізовано представити як результат об'єднання: ДСО нижніх рівнів, деталей, що складають ДСО (зроблених технологічними цехами безпосередньо на даному підприємстві), покупних виробів і кріплення

$$DS^i = \{DS_j^{i+1}\} \cup \{D_k\} \cup \{P_m\} \cup \{K_n\}, \quad (10)$$

де  $DS^i$  – збирання  $i$ -го рівня;  $DS_j^{i+1}$  –  $j$ -те збирання  $i+1$  рівня;  $D_k$  –  $k$ -та деталь, виготовлена на підприємстві;  $P_m$  –  $m$ -й виріб;  $K_n$  –  $n$ -й елемент кріплення.

Для інтеграції проектування, технологічної підготовки та виробництва у єдиний цикл створення виробу важливо представити модель системи кооперації, що бере участь у виробництві складного виробу, тому що співвиконавці і постачальники постійно взаємодіють один з одним на різних рівнях в процесі створення виробу. Система кооперації має не менш складну ієрархічну структуру, коренем якої є головне підприємство, що є виробником основної продукції

$$SK = G \cup \{SI_i\}, \quad (11)$$

де  $SK$  – система кооперації;  $G$  – головний виконавець;  $SI_i$  –  $i$ -й співвиконавець.

Процес створення формалізованої моделі системи кооперації відбувається в процесі закріплення вироблених елементів складного виробу за конкретними підприємствами

$$S_{DS,SK} = \begin{bmatrix} DS_j & SK_i \\ \dots & \dots \\ D_k & \dots \\ \dots & \dots \\ P_m & \dots \\ \dots & \dots \\ K_n & \dots \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де  $S_{DS,SK}$  – бінарне відношення між елементами виробу й елементами системи кооперації.

Крім того на різних стадіях, етапах і роботах по створенню технічного виробу або його елементів склад системи кооперації також може змінюватись. Розглянемо модель процесів створення виробу формалізовану за допомогою мови регулярних схем мережі процесів (РСМП) для відображення закріплення елементів кооперації за роботами по виготовленню технічного виробу.

**2. Логіко-алгоритмічна модель процесу створення складної техніки.** Мова РСМП, запропонований у роботі [6] дозволяє описувати у формі символічного рядка, моделі комплексу робіт будь-якої складності. Розглянемо базис мови РСМП:

$$\text{Basis}^{\text{PCМП}} = \langle Y, X, \text{Res}, \text{Ev}, R, T \rangle, \quad (13)$$

де  $Y$  – алгебра робіт;  $X$  – алгебра умов;  $\text{Res}$  – алгебра результатів;  $\text{Ev}$  – алгебра подій;  $R$  – алгебра ресурсів;  $T$  – системний час

Алгебра робіт представлена у виді

$$Y = \langle Y_i, e, \emptyset, \dot{Y}, \hat{Y}, \check{Y}, \overset{*}{Y}, \overset{x}{Y} \rangle, \quad (14)$$

де  $Y_i$  – одна або комплекс робіт,  $e$  – оператор переходу,  $\emptyset$  – оператор останову,  $\dot{Y}$  – послідовне виконання робіт;  $\hat{Y}$  – паралельне виконання робіт без умов розгалуження;  $\check{Y}$  – паралельне виконання комплексу робіт з вибором одного з них у залежності від умови  $x_k$ ;  $\overset{*}{Y}$  – ітеративні процеси (поворотний перехід у моделі робіт проекту), здійснюваний на визначеній умові;  $\overset{x}{Y}$  – подіє-ініційований процес. Дані операції потрібні для відображення логічних зв'язків між роботами проекту.

Для побудови моделі процесів створення виробу застосуємо мову РСМП. Дана модель включає велику кількість робіт із закріпленими за ними ресурсами, для аналізу процесів необхідно формалізувати дану структуру. Так само виникає проблема розподілу робіт, що виконуються на даному підприємстві і поза їх (державні контролюючі органи, сертифікаційні центри). Для цього, відповідно до правил використання мови РСМП застосуємо:  $a_i$  – оператор, що описує дії підприємства;  $s_i$  – оператор, що описує дії сертифікаційного центру.

Модель, розроблена за допомогою мови РСМП, багаторівнева, верхній рівень складають основні етапи життєвого циклу складної техніки. Послідовний цикл виготовлення умовно можна розділити на сім етапів:  $A_1^{\text{Sys}}$  – проектування виробу;  $A_2^{\text{Sys}}$  – моделювання виробу й інженерні розрахунки;  $A_3^{\text{Sys}}$  – розробка і випуск конструкторської документації;  $A_4^{\text{Sys}}$  – технологічне планування;  $A_5^{\text{Sys}}$  – розробка техпроцесу виготовлення, проектування і виготовлення СТО;  $A_6^{\text{Sys}}$  – розробка керуючих програм;  $A_7^{\text{Sys}}$  – виробництво і  $s_7^{\text{Sys}}$  – контроль виробу.

Формалізована модель послідовного циклу створення виробу:

$$R\_A^{\text{SSys}} = A_1^{\text{Sys}} \cdot A_2^{\text{Sys}} \cdot A_3^{\text{Sys}} \cdot A_4^{\text{Sys}} \cdot A_5^{\text{Sys}} \cdot A_6^{\text{Sys}} \cdot A_7^{\text{Sys}} \cdot s_7^{\text{Sys}}. \quad (15)$$

Базис операторів етапів життєвого циклу при використанні наскрізного паралельного циклу проектування виробу включає підсистеми:  $A_1^{\text{Sys}}$  – проектування виробу;  $A_2^{\text{Sys}}$  – моделювання виробу й інженерні розрахунки, технологічне планування і відпрацювання на технологічність;  $A_3^{\text{Sys}}$  – роз-

робка і твердження конструкторської документації; розробка техпроцесу виготовлення, проектування і виготовлення СТО, розробка керуючих програм;  $A_4^{\text{Sys}}$  – виробництво і  $s_4^{\text{Sys}}$  – контроль виробу.

Формалізована модель етапів і стадій життєвого циклу складної техніки:

$$R\_A^{\text{SSys}} = (A_1^{\text{Sys}} \wedge A_2^{\text{Sys}} \wedge A_3^{\text{Sys}}) \cdot A_4^{\text{Sys}} \cdot s_4^{\text{Sys}}. \quad (16)$$

## Висновки

У роботі проведено аналіз існуючих циклів створення виробу. Зроблено висновок, що паралельне виконання робіт проектування та технологічної підготовки істотно скорочує терміни створення складної техніки. Тому існує необхідність у розробці моделей і методів, які дозволять узгодити дії співвиконавців, які створюють техніку на множині етапів і робіт. Для системного подання процесів проектування, технологічної підготовки та виробництва був застосовано теоретико-множинний підхід. Розроблена формалізована модель дозволяє визначити основні процеси на етапі проектування для подальшого закріплення робіт за співвиконавцями. Процеси виробництва засновані на структурі виробу, яку розроблено на етапі проектування. Саме тому, при закріпленні співвиконавців за деталю-складальними одиницями відбувається систематизація дій системи кооперації по виробництву виробу. Розроблено логіко-алгоритмічну модель процесів створення складної техніки. Для цього було використано мову формалізованого опису регулярних схем мережі процесі. Отриману модель буде використано для дослідження скорочення термінів при реалізації проектів створення складної техніки.

## Список літератури

1. Шачнев С.Ю. *Взаимодействие САПР CATIA, Pro/ENGINEER и ADEM в сквозном цикле создания изделия. Ч. 1 // САПР и графика. – 2007. – С. 87-88.*
2. Зайцев А.Н., Шачнев С.Ю. *Взаимодействие САПР CATIA, Pro/ENGINEER и ADEM в сквозном цикле создания изделия. Ч. 2 // САПР и графика. – 2007. – С. 98-99.*
3. *Обеспечение всех процессов сквозного параллельного проектирования средствами Pro / ENGINEER на примере совместного проекта компании СОЛБЕР и ФГУП «Ижевский механический завод» / Р. Бирбраер, О. Гаршин, Г. Радченко, В. Окатьев, В. Столповский // САПР и графика. – 2003. – № 3. – С. 80-88.*
4. Лыпарь Ю.И. *Структурный синтез электронных цепей. – Л.: ЛПИ, 1982. – 84 с.*
5. Лыпарь Ю.И. *Автоматизация проектирования избирательных усилителей и генераторов. – Л.: ЛГУ, 1983. – 144 с.*
6. Дружинин Е.А., Яшина О.С. *Анализ возможностей применения регулярных алгоритмических языков для моделирования плана проекта // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУПС, 2005. – Вип. 6 (6). – С. 52-56.*

Надійшла до редколегії 5.12.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. І.В. Чумаченко, Національний аерокосмічний університет «ХАІ» ім. М.С. Жуковського, Харків.