

УДК 621.914.22

С.Г. Нагорняк

докт. техн. наук, проф.; К.В. Зеленський, канд. техн. наук, доц.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МЕТОДОЛОГІЯ СТРУКТУРНО-СХЕМНОГО СИНТЕЗУ ВУЗЛІВ МАШИН НА ПРИКЛАДІ ЗБІРНИХ ТОРЦЕВИХ ФРЕЗ

S. Nagornyak

Dr., Prof.; K. Zelenskyu, Ph.D., Assoc. Prof.

THE METHODOLOGY OF STRUCTURE-SCHEME SYNTHESIS OF MACHINES COMPONENTS ON THE EXAMPLE OF SECTIONAL CUTTERS

В машинобудуванні велика кількість верстатного і технологічного обладнання працює під дією змінних (перервних, ударних) навантажень. Такі умови роботи є причиною передчасної втрати конструктивних і технологічних характеристик обладнання. Зменшити негативний вплив від дії змінних навантажень вдається шляхом введення в привідні системи машин пружних з'єднувальних муфт [1].

Процес обробки металів різанням – торцеве фрезерування характеризується змінністю сили різання, супроводжується високим рівнем шуму і вібрацій [2]. Такі високодинамічні явища зменшують довговічність елементів приводів верстату і оснащення, є причиною підвищеного зносу і крихкого руйнування ріжучих елементів збірних торцевих фрез (ЗТФ), погіршують якість і точність обробки. Ефективне зменшення рівня динамічних навантажень при торцевому фрезеруванні досягається зменшенням моменту інерції обертових мас приводу, жорсткою зв'язаних із різцем ЗТФ, збільшенням податливих і демпфуючих характеристик як пружних з'єднувальних муфт в приводі так і пружно-демпфуючих елементів (ПДЕ), додатково введених в конструкцію ЗТФ [3]. Включення ПДЕ безпосередньо в конструкцію фрези перетворює збірний інструмент на пружну муфту. Надалі синтез вузлів машин типу пружних з'єднувальних муфт розглянемо на прикладі синтезу ЗТФ з ПДЕ.

Загальна методологія проектування прогресивних конструкцій ЗТФ з ПДЕ складається із поетапного розв'язання на відповідних ієрархічних рівнях завдань та принципів структурно-схемного, векторного, геометричного, топологічного та динамічного синтезів [4].

В даній статті на першому ієрархічному рівні розглянемо принципи і завдання структурно-схемного синтезу ЗТФ з ПДЕ [6]. Вони полягають у формулюванні підходів та методології поетапної побудови всієї множини можливих структурних схем (СС) нових прогресивних конструкцій ЗТФ. На наступних ієрархічних рівнях (в даній статті не розглядається) за допомогою задачі направленої оптимізації визначається оптимальна СС, згідно якої проектується ЗТФ із раціональними кінематичними, конструктивними та динамічними параметри.

На 1-у етапі структурно-схемного синтезу ЗТФ запропоновано два принципи побудови СС: 1) для зменшення моменту інерції мас приводу, жорсткою зв'язаних із різцем інструменту здійснимо розтин корпусу ЗТФ площинами і поверхнями у напрямках, утворених дискретним або неперервним поворотом формуючої лінії (ліній) навколо осі ЗТФ, або навколо точки на осі, чи навколо точки, зміщеної відносно осі, з використанням методів дзеркального відображення, обертання та лінійного переміщення; 2) для зменшення негативного впливу від дії змінного (ударного) навантаження при торцевому фрезеруванні шляхом підвищення податливості різців введемо ПДЕ в місця розтину корпусу ЗТФ, або замінимо деякі елементи структурних схем ЗТФ на ПДЕ. Геометрична інтерпретація принципів побудови структурних схем ЗТФ та їх об'ємне зображення показано в таблиці 1.

Розглянемо дискретний поворот формуючої лінії (ФЛ) навколо деякої точки O , яку розташуємо по середині корпусу фрези на осі її обертання (верхня частина табл. 1, 2-а стрічка). Корпус фрези в осьовій площині представимо у вигляді прямокутника і позначимо структурні схеми відповідно $a_1 - a_6$ (табл. 1, 5-а стрічка). Точка O є початком променя ФЛ, який неперервно обертаємо навколо осі інструменту і будуємо, таким чином, відповідні конічні січні поверхні (табл. 1, 3-я стрічка), які розділяють корпус фрези на дві частини. Об'ємні зображення утворених структурних схем (СС) ЗТФ показані у 6-ій стрічці (табл. 1) під відповідними буквенними позначеннями $a_1 - a_6$.

На СС a_1 (табл. 1, 6-а стрічка) ФЛ співпадає з віссю обертання фрези. Конструкція ЗТФ за даною СС включає в себе корпус разом із жорстко закріпленими в ньому всіма різцями і оправку. Між оправкою та корпусом ЗТФ може бути встановлена пружно-демпфуюча муфта [8]. Для зменшення маси корпусу ЗТФ муфта або ПДЕ може бути введений безпосередньо в корпус інструменту [14].

На СС a_2 (табл. 1, 6-а стрічка) ФЛ будує січну конічну поверхню, яка відтинає частину об'єму корпусу ЗТФ і зменшує таким чином його масу. Зміна радіуса конуса і розташування на його поверхні ПДЕ, наприклад торових з різними радіусами відносно осі обертання, дозволить регулювати податливість фрези в залежності від конкретних режимів обробки. Направленість нижнього конуса в сторону різців забезпечує можливість швидкої заміни ПДЕ безпосередньо на верстаті [13]. Проте, в конструкції ЗТФ за даною СС, як і в СС a_1 , маса корпусу ЗТФ разом із жорстко закріпленими в ньому всіма різцями залишається значною.

На СС a_3 (табл. 1, 6-а стрічка) ФЛ розтинає корпус на два диски із сукупним торцем у виді конічної поверхні. Диски різняться між собою масами із відповідними моментами інерції. Різці можуть кріпитися до одного і другого диска по черзі. Це дає можливість забезпечити різні частоти коливань між сусідніми зубами інструменту в процесі обробки і позитивно впливати на вібростійкість ЗТФ.

На СС a_4 (табл. 1, 6-а стрічка) ФЛ також розтинає корпус на два диски, але тепер з рівними масами. Різні частоти коливань між сусідніми зубами будуть забезпечувати різні довжини державок різців. Різні схеми передачі крутного моменту, розташування ПДЕ, конструктивні та податливі їх характеристики можна підбирати залежно від вимог обробки. В даній СС є можливість отримувати диски різної маси, якщо точку O зміщувати вздовж осі в будь-якому напрямку [10].

На СС a_5 (табл. 1, 6-а стрічка) ФЛ утворює два диски з протилежно направленою до СС a_3 січною конічною поверхнею. Фреза за даною СС характеризується такими ж властивостями, як і за СС a_3 , a_4 . Крім того, дводисковими ЗТФ ($a_3 - a_5$) можна одночасно виконати чорнову і чистову обробку, коли зуби нижнього диска здійснюють чорнове різання, а зуби верхнього диска – чистове (при заданому поділі глибин різання між зубами обох дисків).

На СС a_6 (табл. 1, 6-а стрічка) ФЛ відтинає частину об'єму від корпусу ЗТФ у виді верхнього конуса. Конструкція інструменту за даною СС буде володіти подібними властивостями до ЗТФ за СС a_2 .

Далі продовжимо розглядати дискретний поворот формуючої лінії навколо точки O на осі фрези. Корпус фрези, в площині перпендикулярній до осі, представимо у вигляді кола (ліва вертикальна частина табл. 1, 3-ій стовпець). Величина кута повороту ФЛ залежить від кількості зубів інструменту (z), а початок відліку приймемо в зоні між різцями фрези (табл. 1, 4-й стовпець). Дзеркальне відображення променя ФЛ відносно точки O будує січну лінію ФЛ, переміщення якої вздовж осі фрези утворюють січні площини, які поділяють корпус ЗТФ на елементи – СС $b_1 - b_4$ (табл. 1, 6-й стовпець). Об'ємні зображення утворених СС ЗТФ показані у 7-у стовпці (табл. 1) біля відповідних позначень - $b_1 - b_4$.

Таблиця 1 – Принципи побудови і об'ємне зображення структурних схем ЗТФ з ПДЕ

Етапи синтезу	Об'єкт синтезу	Межі кута φ							
		Межі кута φ	Поворот променя навколо т. О	$\varphi=0+k\pi$	$0<\varphi<\pi/2$	$\pi/4<\varphi<\pi/2$	$\varphi=\pi/2$	$\pi/2<\varphi<\pi/4$	$\pi/4<\varphi<\pi$
		Поворот променя (т.А.) навколо т.О	Переміщення формуючої лінії (ФЛ) вздовж осі	Поворот формуючої лінії (ФЛ) навколо осі					
		Структурні схеми матриці А							
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6		
Добуток елементів матриць В ^T , С ^T , D ^T на елементи матриці А	Структурні схеми матриці В ^T	$\varphi=0$	$\varphi=0$	b_1					
		$0<\varphi<\pi/2$		b_2					
		$\varphi=\pi/4$		b_3					
		$\varphi=\pi/2$		b_4					
	Структурні схеми матриці С ^T	$0<\varphi<\pi/2$		c_1					
		$\varphi=\pi/2$		c_2					

$\varphi = \frac{\pi}{2}$			Структурні схеми матриці D^T	c_3						
$\varphi = \frac{2\pi}{A}$				d_1						
$\varphi = \frac{2\pi}{A}$				d_2						

Структурна схема b_1 (табл. 1, 7-й стовпець) побудована з використанням додаткового прийому - промінь ФЛ ліквідується, а його початок (точка O) залишається. Переміщення точки O вздовж осі обертання інструменту утворює січний промінь і СС b_1 стає подібною до СС a_1 .

На СС b_2 (табл. 1, 7-й стовпець) ФЛ будують січні площини, які розтинають корпус на сектори, до кожного з яких жорстко кріпиться тільки один різець. Така схема зменшує масу корпусу фрези в z разів [11]. Крім того, кожний сектор-різець оснащується незалежним ПДЕ, конструкції яких можуть відрізнятися. В цьому випадку різці володітимуть різними частотами власних коливань, а звільнені від різання різці, внаслідок своєї рухомості, виступатимуть в ролі динамічних погашувачів коливань, що виникають в процесі фрезерної обробки.

На СС b_3 і b_4 (табл. 1, 7-й стовпець) січні площини розтинають корпус так, що з кожним сектором жорстко з'єднані по два і чотири різці відповідно. ЗТФ, побудовані за такими СС, будуть характеризуватися сукупними ознаками від СС b_1 і b_2 .

Розглянемо ще два прийоми побудови СС ЗТФ. 1) В нормальному перерізі на корпусі фрези задається точка A (декілька точок A, кратних числу z), розташована на деякій відстані від осі інструменту (ліва вертикальна частина табл. 1, 3-4-й стовпці). В першому випадку (табл. 1, СС $c_1 - c_3$), поворот ФЛ здійснюється навколо точки A, дзеркально відображається відносно осі, що проходить через середину різця і буде, таким чином, ламаною формуючою лінією ФЛ. Січні площини будуються переміщенням ламаної ФЛ вздовж осі обертання фрези. 2) В другому випадку (табл. 1, СС d_1, d_2) – промінь ФЛ ліквідується, поворот точки A навколо осі обертання фрези буде ФЛ у виді дуги. Січні циліндричні поверхні будуються переміщенням дугових ФЛ одного або різних радіусів вздовж осі фрези.

На СС c_1 (табл. 1, 7-й стовпець) січними площинами утворені сектори, осі можливого обертання яких зміщені відносно осі обертання корпусу фрези. За даною СС можуть бути спроектовані дві ЗТФ. У одній, кожен різець жорстко з'єднаний із окремим шарнірним сектором-державкою [9], у другій – різці чергуються між собою і один жорстко з'єднується із сектором, а другий із корпусом фрези. Сектори-державки оснащуються ПДЕ. Зміщення осі обертання секторів-державок відносно осі фрези забезпечує кінематичне зменшення товщини зрізаного шару на етапі врізання.

На СС c_2 (табл. 1, 7-й стовпець) січні площини розтинають корпус ЗТФ на сектори різної форми з можливими коловими і дотичними напрямками відносних зміщень. Чергування різних напрямків відносних зміщень між сусідніми секторами-

різцями у реальній конструкції ЗТФ забезпечить різні схеми зрізання припуску зубами фрези і відповідно змінить монотонність дії силових спектрів на обробляючу систему.

На СС c_3 (табл. 1, 7-й стовпець) січними площинами відтинаються від корпусу ЗТФ сектори-різці з можливими дотичними відносними зміщеннями. ЗТФ за такою схемою володітиме ознаками подібними до ЗТФ за СС c_1, c_2 .

За СС d_1 (табл. 1, 7-й стовпець) можлива побудова конструкції ЗТФ, у якій маса корпусу разом із жорстко закріпленими в ньому різцями зменшена на масу внутрішнього циліндра. Між внутрішнім циліндром і корпусом ЗТФ встановлюються ПДЕ [14].

За СС d_2 (табл. 1, 7-й стовпець) можлива побудова конструкції ЗТФ, у якій сектори відрізняються радіусами внутрішнього циліндра і відповідно мають різні маси. До кожного сектора жорстко кріпиться по одному або два різці. Така ЗТФ характеризуватиметься різними частотами власних коливань секторів-різців.

Запропоновані позначення кожної СС використаємо для формалізації даного етапу структурно-схемного синтезу ЗТФ в матричній формі. Згрупуємо побудовані СС ЗТФ за принципами побудови у відповідні матриці-стрічки:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Об'єднаємо множину побудованих СС (1) в єдину матрицю-стрічку:

$$[S_{\text{л}}] = \begin{bmatrix} A & B & C & D \end{bmatrix}, \quad (2)$$

яку назвемо матрицею **лінійного структурно-схемного синтезу СС ЗТФ**.

Множина СС ЗТФ (2) не обмежується запропонованою кількістю побудованих СС і може бути розширена при застосуванні додаткових принципів побудови СС ЗТФ.

На 2-у етапі розвинемо методологію побудови СС ЗТФ. Для цього використаємо матричну форму представлення СС ЗТФ (1) і перемножимо транспоновані матриці-стовпчики B^T, C^T і D^T на матрицю-стрічку A вклавши в цю математичну дію фізичний зміст накладання СС однієї матриці на СС матриці A . В результаті одержимо матрицю **площинного (двовимірного) структурно-схемного синтезу СС ЗТФ** – $[S_{\text{п}}]$:

$$[S_{\text{п}}] = \begin{bmatrix} B^T \\ C^T \\ D^T \end{bmatrix} \cdot [A] = \begin{bmatrix} B^T \cdot A \\ C^T \cdot A \\ D^T \cdot A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 a_1 & b_1 a_2 & \dots & b_1 a_6 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_4 a_1 & b_4 a_2 & \dots & b_4 a_6 \\ c_1 a_1 & c_1 a_2 & \dots & c_1 a_6 \\ c_2 a_1 & c_2 a_2 & \dots & c_2 a_6 \\ c_3 a_1 & c_3 a_2 & \dots & c_3 a_6 \\ d_1 a_1 & d_1 a_2 & \dots & d_1 a_6 \\ d_2 a_1 & d_2 a_2 & \dots & d_2 a_6 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Геометрична інтерпретація отриманих СС ЗТФ структурно-схемного синтезу $[S_{\text{п}}]$ (3) у виді об'ємних зображень показана у табл. 1. Конструкції ЗТФ за СС $[S_{\text{п}}]$ (3) (табл. 1) володіють сукупними ознаками і характеристиками від СС $[S_{\text{л}}]$ (2), в наслідок об'єднання яких вони утворені.

На 3-у і наступних етапах структурно-схемного синтезу ЗТФ нові СС будуються добутком матриць попередніх етапів синтезу на матрицю-стрічку $[S_{\text{л}}]$ (2) з отриманням матриць **тривимірного і наступних вимірів стуктурно-схемних синтезів СС ЗТФ**.

Висновок. До деяких структурних схем двовимірного структурно-схемного синтезу ЗТФ авторами запропоновано нові конструкції ЗТФ з ПДЕ і отримано авторські

свідoctва на винаходи та патенти: b_{1a1} – ЗТФ з пружно-демпфуючою муфтою [8]; b_{1a4} – дводискова ЗТФ [10]; b_{2a1} – ЗТФ із секторами-різцями [11]; b_{1a2} – ЗТФ із торовими ПДЕ [13]; c_{1a1} – ЗТФ із шарнірними секторами-державками [9]; d_{1a1} – ЗТФ із втулковими ПДЕ [14].

Запропоновані принципи побудови і моделювання структурних схем ЗТФ з ПДЕ можуть бути застосовані в інших галузях промислового виробництва: 1) Включення пружних елементів та ПДЕ в запобіжні механізми для токарних, свердлильних, фрезерних робіт та вихревого нарізання різей [1]; 2) Обертання у протилежні сторони дисків фрези за схемами b_{1a3} - b_{1a5} забезпечує високопродуктивну фрезерну обробку деталей малої жорсткості [5, 12]; 3) Застосування ПДЕ з високою податливістю за схемою $d_2d_1b_2a_1$ чотиривимірного структурно-схемного синтезу ЗТФ дозволяє перейти до проектування іншого класу ЗТФ із зменшеним часом холостих переміщень різців [7, 15, 16], які забезпечують зменшення амплітуди коливань температури різання при торцевому фрезеруванні і, відповідно, підвищення стійкості різців;

Література:

1. Нагорняк С.Г., Луцив И.В. Предохранительные механизмы металлообрабатывающего оборудования: Справочник. – К.:Тэхника, 1992. – 72 с.
2. Gygax P.E. Dynamics of single-tooth milling. CIRP Annals, 1979, Vol. 28. – № 1. P. 65 – 70.
3. Нагорняк С.Г., Зеленский К.В. Синтез сборных торцовых фрез с упруго-демпфирующими элементами // Изв. вузов. Машиностр. – 1991. № 10-12. – С. 123-126.
4. Нагорняк С.Г., Зеленский К.В. Снижение ударных нагрузок при торцовом фрезеровании // Информатизация и новые технологии. – 1993. -№ 1. - С. 30-31.
5. Нагорняк С. Г., Зеленский К. В. Двухфрезерная обработка деталей малой жесткости // Информатизация и новые технологии. – 1993. -№ 2. -С. 18-19.
6. Нагорняк С.Г., Зеленський К.В. N-вимірний структурно-схемний синтез вузлів систем на прикладах збірних торцевих фрез і з'єднувальних муфт з пружно-демпфуючими елементами / Депоновано у ДНТБ України 22.04.1996, № 967-Ух96. -22с.
7. Нагорняк С. Г., Зеленський К. В., Козак В.І. Торцеві фрези з регульованим часом холостих переміщень різців / Вісник Терноп. держ. техн. у-ту ім.. І. Пулюя. – Тернопіль: ТДТУ. 2000. Том 5, число 2. - С. 43-46.
8. А. с. № 831426 СССР, МКИ В23С 5/06. Сборная торцовая фреза / С. Г. Нагорняк – Заявлено 12.09.1979; Оpubл. 23.05.1981. Бюл. № 19. - 3 с.
9. А. с. № 852460 СССР, МКИ В23С 5/06. Торцовая фреза / С. Г. Нагорняк – Заявлено 05.06.1979; Оpubл. 07.08.1981. Бюл. № 29. - 3 с.
10. А. с. № 1703295 СССР, МКИ В23С 5/06. Сборная торцовая фреза / С.Г. Нагорняк, К.В. Зеленский – Заявлено 03.01.1990; Оpubл. в Б.И. № 1, 1992.
11. А. с. № 1750859 СССР, МКИ В23С 5/06. Сборная торцовая фреза / С.Г. Нагорняк, К.В. Зеленский – Заявлено 11.11.1990; Оpubл. в Б.И. № 28, 1992. - 3 с.
12. А. с. № 1763103 СССР, МКИ В23С 3/00. Способ фрезерования / С.Г. Нагорняк, К.В. Зеленский – Заявлено 23.05.1990; Оpubл. в Б.И. № 35, 1992. – 4 с.
13. А. с. № 1771894 СССР, МКИ В23С 5/06. Сборная торцовая фреза / С.Г. Нагорняк, К.В. Зеленский – Заявлено 01.02.1991; Оpubл. в Б.И. № 40, 1992. – 3 с.
14. А. с. № 1780942 СССР, МКИ В23С 5/06. Сборная торцовая фреза / С.Г. Нагорняк, К.В. Зеленский – Заявлено 04.12.1990; Оpubл. в Б.И. № 46, 1992. – 4 с.
15. Декларацийний патент на винахід UA № 18023, МПК 6 В23С5/06. Збірна торцева фреза / С. Г. Нагорняк, К. В. Зеленський, В. І. Козак – Оpubл. 17.06.1997. -3с.
16. Декларацийний патент на винахід UA № 33197 А, МПК 6 В23С5/06. Збірна торцева фреза / С. Г. Нагорняк, К. В. Зеленський, В. І. Козак – Оpubл. 15.02.2001, Бюл. № 1.-3с.