

ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

УДК 629.114.026

Д. О. ВОЛОНЦЕВИЧ, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХП»;

В. І. СЕРИКОВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХП»;

С. С. ПАСІЧНИЙ, студент НТУ «ХП»

АВТОМАТИЗАЦІЯ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ ПЛАНЕТАРНИХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

В статті запропонований алгоритм і програмний продукт, які дозволяють за заданими передаточними відношеннями в автоматизованому режимі синтезувати всі можливі структурні схеми планетарної коробки передач з двома ступенями свободи. Далі для всіх синтезованих структурних схем за допомогою хвильового алгоритму Лі перевіряється можливість конструктивної реалізації кінематичної схеми. Для тих схем, які реалізуються конструктивно, знаходяться всі основні кінематичні і силові характеристики. Це дозволяє не тільки задовольнити всім конструктивним обмеженням, а й обрати схему, яка має найкращі показники за обраними кількісними характеристиками якості.

Ключові слова: транспортні засоби, трансмісії, планетарні коробки передач, критерій якості трансмісії, кількісні критерії якості, структурно-параметричний синтез, алгоритм, передаточні відношення.

Вступ. Планетарні коробки передач (ПКП) використовуються в силових передачах самохідних транспортних і тягових машин з перших десятиліть ХХ століття. Спочатку застосування ПКП було вкрай рідкісним, що пояснюється відсутністю на той час досить розвиненої теорії планетарних передач і невисоким, за сучасними мірками, технологічним рівнем машинобудування.

З часом використання ПКП безперервно зростало і, до рубежу ХХ-ХХІ століть, придбало практично абсолютний статус у складі силових передач переважної більшості зразків легкових і вантажних автомобілів, автобусів, промислових і сільськогосподарських тракторів, будівельних і дорожніх машин та об'єктів бронетанкової техніки.

Є всі підстави вважати, що, принаймні в досяжному майбутньому, рівень використання ПКП, за умови їх подальшого вдосконалення, буде тільки зростати.

До теперішнього часу в світі створені тисячі різних схем ПКП, але ресурси творчості в цій області далеко не вичерпані. Інженери ХХІ століття повинні створювати нові прогресивні схеми ПКП для перспективних машин,

а це можливе тільки за умови докладного і ретельного аналізу вже наявних схем ПКП.

Після виконання тягового розрахунку машини та розбивки передаточних чисел в коробці передач перед конструктором стоїть проблема вибору найбільш раціональної схеми її конструкції, яка реалізує задані передаточні числа. Якщо при виборі кінематичної схеми з нерухомими осями валів зазвичай не виникають такі проблеми, то вибір схеми ПКП являє собою найбільш важку і відповідальну задачу для конструктора. Проблема полягає у тому, що для даних передаточних чисел можливо побудувати велику кількість схем ПКП. При цьому ці схеми будуть відрізнятися між собою за важкістю, величиною коефіцієнта корисної дії (ККД) та низкою інших показників, що впливають на технічний рівень конструкції, яка розробляється. Не знаючи засад проектування ПКП практично неможливо побудувати всі можливі схеми, що реалізують дані передаточні числа, і тим більше обрати з них найбільш раціональну.

Дана робота присвячена автоматизації проектування ПКП, що може значно допомогти в заощадженні часу та трудових ресурсів.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. На даний момент проектувальниками використовується метод синтезу ПКП, що був свого часу розроблений М.О. Крейнсом. В подальшому цей метод неодноразово покращувався його учнями [1–9]. Для ПКП з двома ступенями свободи цей метод добре пророблений і в ньому присутній лише один етап, що потребує безпосередньої участі в процесі людини – це етап перевірки можливості створення за принципіальною схемою схеми кінематичної. Проблема складається в тому, що далеко не будь-яка принципіальна схема може бути реалізована як кінематична із-за неможливості здійснити необхідні зв'язки між елементами планетарних рядів та елементами керування. Безумовно, подібні задачі провідними розробниками ПКП вже в тій чи іншій мірі розв'язані, але вичерпної інформації на цю тему у доступній літературі не знайдено, тим більше не має вільно доступних програмних продуктів, які дозволяють повністю автоматизувати цей процес.

Ціль і постановка задачі. Для побудування методики автоматизованого синтезу ПКП за заданими передаточними відношеннями і програмного продукту, що її реалізує, необхідно:

- провести генерацію всіх можливих сполучень взаємних зв'язків між елементами ПКП, що можуть складати схему;
- перевірити і відбракувати схеми, які не задовольняють вимогам за кількісними критеріями якості ПКП, та сортувати за ступенем оптимальності ті, що залишилися;
- перевірити ті схеми, що залишилися, на можливість реалізації їхніх кінематичних схем.

Алгоритм генерації всіх можливих сполучень взаємних зв'язків між елементами ПКП, що можуть скласти схему.

В даній роботі був використаний оригінальний алгоритм побудови всіх можливих комбінацій кінематичних схем для ПКП з двома ступенями свободи і двома, трьома або чотирма планетарними механізмами (ПМ) з відсіюванням варіантів, що не задовольняють основним критеріям синтезу. В подальшій роботі передбачається розширення можливостей створюваного програмного комплексу на ПКП з трьома та чотирма ступенями свободи.

Власне алгоритм має такий вигляд:

- 1) Введення кількості передач.
- 2) Вибір кількості ступенів свободи.
- 3) Визначення мінімальної кількості ПМ та гальм. Виконується за табл. 1.
- 4) Визначення мінімальної кількості необхідних зв'язків при даній кількості ступенів свободи. Обчислюється за формулою:

$$N=2n_{\text{пм}} - W, \quad (1)$$

де N – кількість необхідних зв'язків;

$n_{\text{пм}}$ – кількість ПМ;

W – кількість ступенів свободи.

- 5) Перебір всіх можливих варіантів комутації елементів в кінематичній схемі:

– вхід на всі ланки;

– вихід на всі вільні ланки;

– всі поєднання зв'язків.

- 6) Визначення елементів, що з'єднані з гальмами.

- 7) Відсіювання варіантів за наступними критеріями:

– не допускається прями́й зв'язок між входом і виходом;

– не допускається гальмування вхідного або вихідного валів та елементів, що з ними жорстко зв'язані.

Алгоритм перевірки результатів на можливість реалізації їхніх кінематичних схем.

Завдання моделювання маршрутів (трасування) – одне з найбільш трудомістких завдань у загальній проблемі автоматизації проектування. Це пов'язано з декількома факторами, зокрема з різноманіттям способів конструктивно-технологічної реалізації різних трас, для кожного з яких при алгоритмічному вирішенні завдання застосовуються специфічні критерії оптимізації і обмеження. З математичного погляду трасування – найскладніше завдання вибору оптимального рішення з величезного числа варіантів.

Таблиця 1 – Мінімальна кількість структурних елементів ПКП [1]

Кількість ступенів свободи W	Основні елементи ПКП	Кількість елементів в ПКП при кількості передач (ПХ + ЗХ без прямої передачі)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	n_ϕ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	n_Γ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$n_{\text{ПМ}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	n_ϕ	–	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	n_Γ	–	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4
	$n_{\text{ПМ}}$	–	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5
4	n_ϕ	–	–	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	n_Γ	–	–	1	2	2	2	2	2	3	3	3
	$n_{\text{ПМ}}$	–	–	3	4	4	4	4	4	5	5	5
5	n_ϕ	–	–	–	4	4	4	4	4	4	4	4
	n_Γ	–	–	–	1	3	3	3	3	3	3	3
	$n_{\text{ПМ}}$	–	–	–	3	4	4	4	4	4	4	4

При синтезі ПКП, незалежно від метода, рано чи пізно проектувальник стикається з комутацією елементів ПКП між собою. Це пов'язано з необхідністю перевірки складеності окремої структурної схеми. Найбільшу складність являють собою схеми, в яких ланки, що зеднані з вхідним і вихідним валами, належать одному ПМ або ПМ, що знаходяться між іншими. В цих випадках найбільш гостро стає питання визначення такого порядку проведення комутації, щоб можна було провести всі зв'язки (якщо це можливо) (рис. 1).

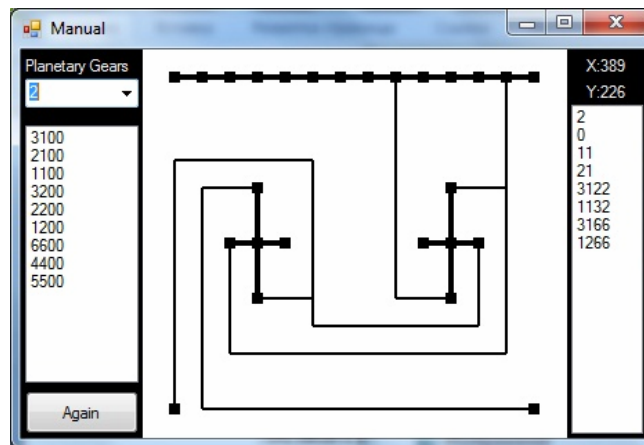


Рис. 1 – Приклад проведення ліній комутації

У випадках, коли ні один зв'язок не проводиться по найкоротшому маршруту, при будь-якому порядку комутації неможливо скласти схему без накладення обмежень таким чином, щоб перший зв'язок був проведений неоптимальним шляхом (рис. 2):

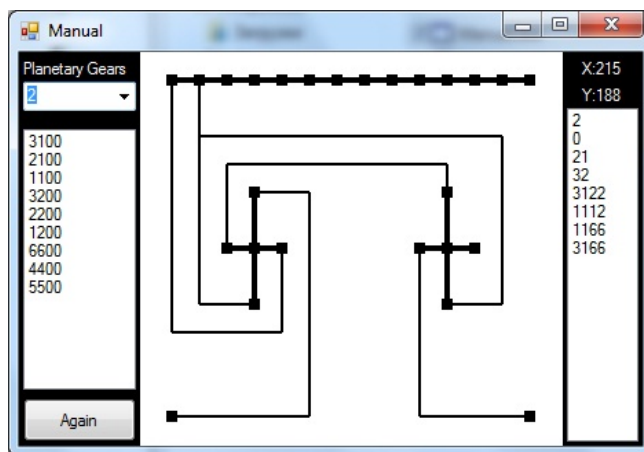


Рис. 2 – Зв'язок, що поєднує ведучий вал із епіциклічною шестернею першого ряду, проведений не за найкоротшим маршрутом

Для проведення комутації був розроблений оригінальний алгоритм, що враховує всі вищевказані випадки. Для пошуку маршруту між ланками був використаний хвильовий алгоритм, який можна назвати одним з найбільш унікальних алгоритмів трасування. Хвильовий алгоритм дозволяє сформувати шлях (трасу) між двома ключовими точками (елементами) в будь-якому лабіринті, де він може бути сформованим [10].

Вихідні дані, цілі і завдання, які потрібні для роботи хвильового алгоритму можна коротко сформулювати наступним чином:

Хвильовий алгоритм вирішує задачу знаходження (пошуку) шляху на плоскій двовимірній картатій карті. Кожній клітці карти присвоюється одне з двох станів "порожня" і "перешкода", також обираються клітини "початку" і "кінця" шляху.

Мета хвильового алгоритму – знаходження шляху на карті між початковою, кінцевою точкою (кліткою).

Хвильовий алгоритм працює з кінця, тобто з кінцевої клітини в усі напрямки поширюється хвиля кроком в одну клітку по радіусу. Далі хвиля поширюється з сусідніх клітин і т.д., немов ланцюгова реакція. Цей процес триває, поки не буде досягнута клітина початку шляху або не будуть заповнені всі поля, тобто завдання не можна вирішити. Хвиля рухається тільки по порожніх клітинах.

Для виконання поставлених задач алгоритм був значно дорацьовано, це пов'язано з низкою особливостей трасування ПКП.

Етапи хвильового алгоритму:

1) З початкового положення (елементу) хвиля поширюється в 4-х напрямках. Елемент, в який прийшла хвиля, створює новий фронт хвилі. Кожен з елементів першого фронту хвилі буде джерелом вторинної хвилі. Елементи другого фронту хвилі будуть генерувати хвилю третього фронту і

т.д. Процес формування хвиль триває, поки не буде досягнутий кінцевий елемент або заповнено всі клітинки.

2) На другому етапі хвильового алгоритму будується сама траса. Її побудова здійснюється відповідно до наступних правил:

Рух при побудові траси необхідно здійснювати відповідно з обраними пріоритетами.

При русі від кінцевого елемента до початкового номер фронту хвилі (шляхові координати) повинні зменшуватися.

Пріоритети напрямки руху при використанні хвильового алгоритму знаходження шляху обираються на стадії розробки. Якщо змінювати ці пріоритети, то можна отримати різні траси, але довжина траси в будь-якому випадку залишається однією і тією ж.

Переваги хвильового алгоритму в тому, що з його допомогою можна знайти трасу в будь-якому лабіринті і з будь-якою кількістю стін. Єдиним недоліком хвильового алгоритму є, те, що при побудові траси потрібен великий обсяг пам'яті.

Пріоритет руху, в даному випадку, обирається таким чином, щоб траса мала якомога менше поворотів.

Особливістю даної реалізації хвильового алгоритму є те, що він знаходить найкоротший шлях не лише між точками, а і між ламаними. При цьому буде обрано таку пару точок, щоб відстань між ними була найменшою.

На етапі власне трасування виконується пошук такої комбінації зв'язків, при якій можливо провести всі зв'язки. Спочатку до елемента входу підводиться зв'язок, який є базовим, всі інші зв'язки не можуть впливати на нього. Решта зв'язків проводяться, спочатку, в тій послідовності, в якій вони записані у вихідному коді, але якщо один з них провести не вдається, він переміщується на перше місце. При цьому, якщо два зв'язки ворогують один з одним і починають мінатися між собою першим і другим місцями, пошук комбінації припиняється і базовий зв'язок проводиться до елемента входу з іншого боку і все починається знову.

Генерація всіх можливих комбінацій зв'язків для комутації в структурній схемі ПКП виконується, також, оригінальним алгоритмом.

Вхідними даними є номери вхідної та вихідної ланок. Це зроблено для можливості примусового завдання елементів входу і виходу. Об'єкт генерує всі можливі комбінації зв'язків і визначає елементи, які потрібно з'єднати з гальмами. Якщо кількість цих елементів більша, ніж передбачена табл. 1, то це означає що в цій схемі існують такі ланцюги зв'язків, що містять у собі і елемент входу, і елемент виходу або дві ланки одного ПМ. Таким чином автоматично відсіюються всі коди, що не придатні для подальшого використання.

Алгоритм визначення внутрішніх передаточних відношень планетарних рядів за заданими передаточними відношеннями ПКП та повний аналіз схеми.

В будь-якій кінематичній та структурній схемах ПКП швидкості обертання всіх центральних ланок ω_a , ω_b та ω_h пов'язані між собою та внутрішніми передаточними числами ПМ k за допомогою рівнянь Вілліса, що можуть бути записані для кожного ПМ окремо:

$$\omega_a - k\omega_b + \omega_h(k-1) = 0, \quad (2)$$

де k – внутрішнє передаточне відношення ПМ, яке для тривіального ПМ визначається через числа зубів епіциклічного і сонячного коліс, як

$$k = -\frac{z_b}{z_a}.$$

Визначення внутрішніх передаточних відношень планетарних рядів через відомі передаточні відношення ПКП пов'язано з рішенням системи рівнянь змінної структури. Тому було прийнято рішення знаходити k для всіх ПМ шляхом їх перебору в заданому діапазоні з обраним шагом для забезпечення необхідної точності. Якщо в заданому діапазоні рішення, що задовольняє точності реалізації потрібних передаточних відношень не знаходиться, то така схема відбраковується.

Далі по знайдених внутрішніх передаточних відношеннях всіх ПМ з урахуванням умов соосності, складання та сусідства підбираються числа зубів на всіх зубчастих колесах і проводиться повний кінематичний та силовий аналіз за відомими методиками синтезу планетарних передач [1–6].

Він включає в себе:

– визначення швидкостей обертання всіх центральних ланок ПКП і сателітів на всіх передачах за умови швидкості обертання вхідної ланки $\omega_{\text{вх}} = 1$;

– визначення крутних моментів на всіх центральних ланках ПКП без урахування втрат в зубчастих зачепленнях та з їх урахуванням на всіх передачах за умови крутного моменту на вхідній ланці $M_{\text{вх}} = 1$;

– визначення крутних моментів на всіх ввімкнених фрикціонах та гальмах на всіх передачах за умови крутного моменту на вхідній ланці $M_{\text{вх}} = 1$;

– визначення всіх кількісних критеріїв якості ПКП [11];

– визначення інтегральної оцінки якості схеми [11].

Опис інтерфейсу програмної реалізації синтезу ПКП

В процесі виконання даної роботи була розроблена програма, що проводить синтез ПКП з двома ступенями свободи (рис. 3).

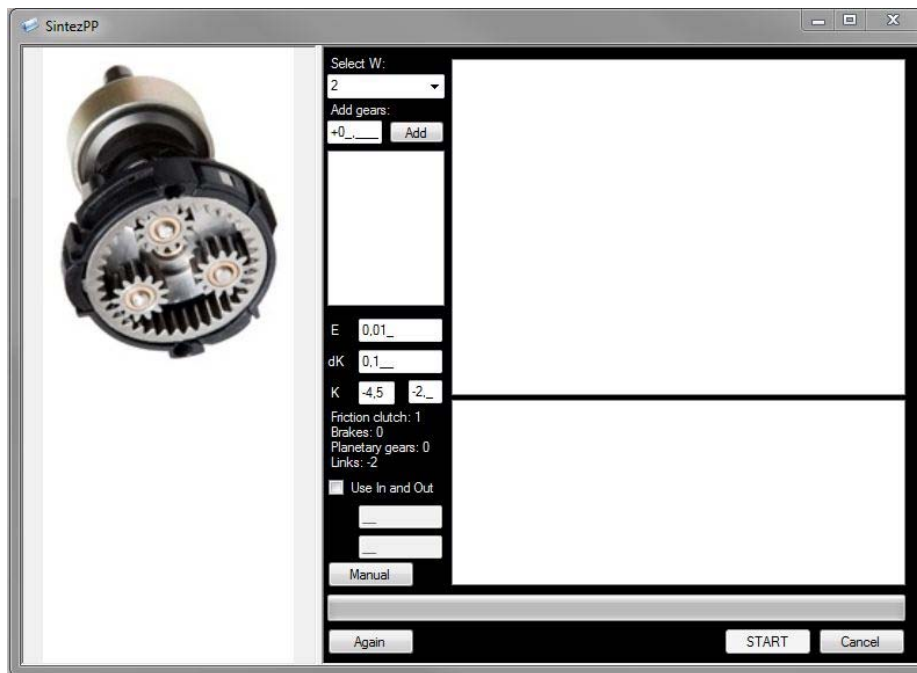


Рис. 3 – Інтерфейс програми

Після запуску програми відкривається головна форма, на якій необхідно обрати кількість ступенів свободи ПКП, що синтезується. Потім додаються передаточні відношення непрямих передач.

Якщо користувач бажає примусово задати ланки, що з'єднуються з вхідним та вихідним валами, то він має поставити прапорець “Use In and Out” та ввести номери цих ланок (рис. 4). Потім натиснути кнопку “Next” та зачекати доки не з'являться результати обчислень (рис. 5).

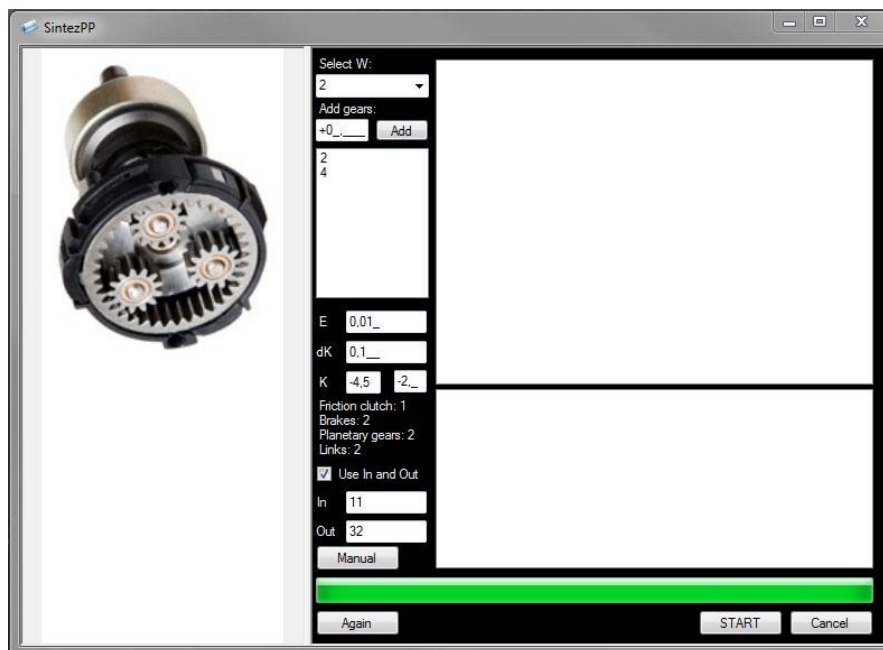


Рис. 4 – Завдання вихідних даних

Для перегляду конкретної схеми необхідно кликнути по ній мишкою і на екран в новій формі виведеться її структурна схема (рис. 6) а в полі в нижній частині вікна результати параметрів (внутрішні передаточні відношення планетарних рядів, кутові швидкості ланок, числа зубів, моменти тощо).

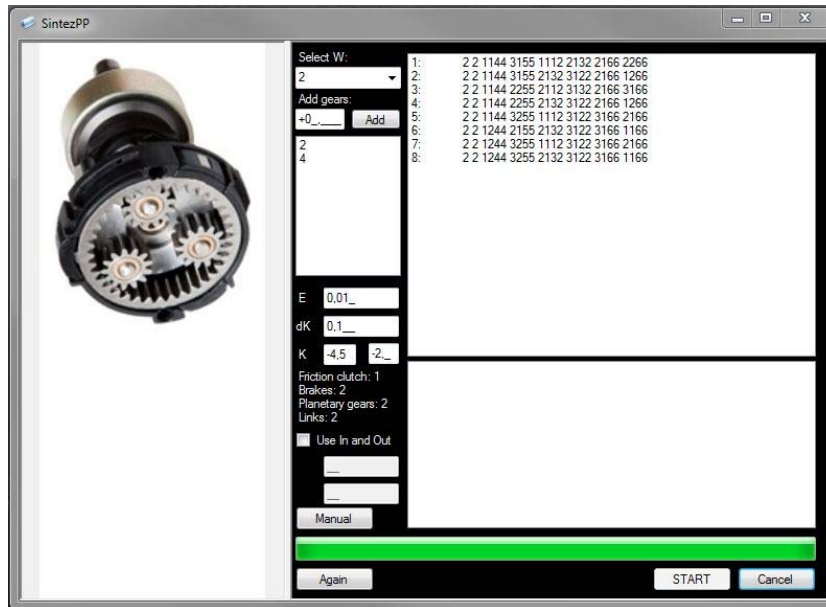


Рис. 5 – Генеровані схеми

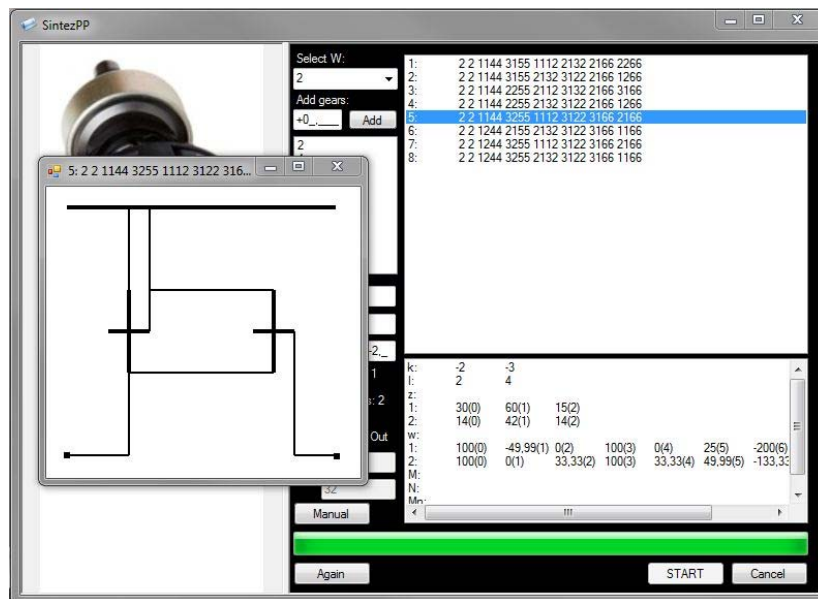


Рис. 6 – Перегляд конкретної схеми

Також в програмний комплекс увійшла програма для ручної комутації ланок. При використанні цієї програми оператор повинен сам визначитися зі зв'язками, які він буде проводити. Ця програма призначена для ручної

перевірки складаності вже генерованих схем, якщо є підозра, що основна програма зробила це некоректно, і обчислення параметрів ПКП з відомою структурною схемою.

Програма запускається окремо або через основну програму шляхом натискання на кнопку “Manual”. Після запуску програми оператор повинен обрати пари елементів, між якими потрібно провести звязки. В результаті заповнюється вектор звязків. Вектор має таку структуру:

X – кількість елементарних ПМ;

X – кількість елементів, що з'єднані з гальмами;

XX – елемент входу;

XX – елемент виходу;

XXXX – звязки (декілька);

XX – елементи, що з'єднані з гальмами (декілька, кількість визначається за табл. 1);

Також необхідно задати данні для розрахунку параметрів ПКП:

– бажаний діапазон внутрішніх передаточних відношень;

– крок перебору внутрішніх передаточних відношень;

– точність пошуку.

При виконанні програми звязки, що з'єднують ланки з гальмами, представляються як звязки між ланками. Це зроблено для того, щоб дещо помякшити правила користування програмою (щоб можна було задавати звязки і гальма незалежно одне від одного) (рис. 7).

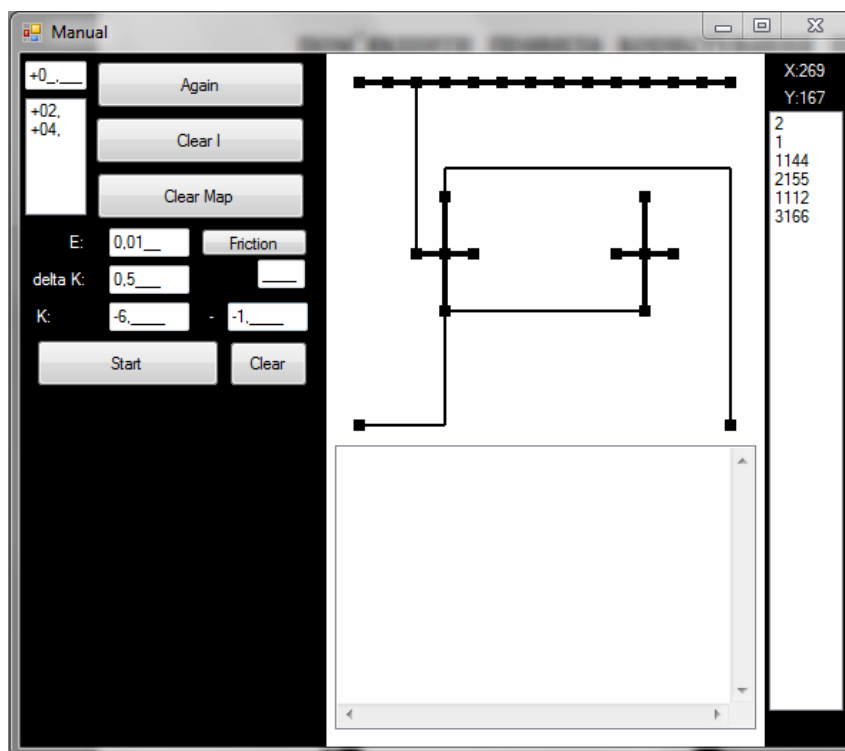


Рис. 7 – Програма Manual

сдвоенными сателлитами для перспективных гусеничных машин : дис. канд. техн. наук : 05.05.03 / Мельников Олег Александрович. – Волгоград, 2004. – 192 с. **7.** Курис Э. В. Основы новых методов кинематического расчета коробок передач : дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Курис Эдуард Валерьевич. – Ростов-на-Дону, 2009. – 203 с. **8.** Саламандра К. Б. Синтез схем многоскоростных комбинированных коробок передач с неподвижными и подвижными осями зубчатых колес : дис. канд. техн. наук : 05.02.18 / Саламандра Константин Борисович. – Москва, 2009. – 172 с. **9.** Садыкова А. Я. Структурный синтез планетарных зубчатых коробок передач с одновенцовыми сателлитами : дис. канд. техн. наук : 05.02.18 / Садыкова Анна Яковлевна. – Уфа, 2006. – 167 с. **10.** Реализация волнового алгоритма для определения кратчайшего маршрута на плоскости при моделировании трасс с препятствиями / А. С. Козадаев, Е. В. Дубовицкий // Вестник ТГУ, – Т.15, – Вып. 6, 2010. **11.** К вопросу о количественных критериях качества кинематических схем планетарных коробок передач / Д. О. Волонцевич, Е. О. Веретенников, С. С. Пасичный // Вісник НТУ "ХПІ", Збірник наукових праць. Серія : Транспортне машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», – 2013. – №31(1004). – С. 105-110. **12.** Волонцевич Д. О. К вопросу разбивки передаточных отношений бортовых планетарных коробок передач гусеничных машин / Д. О. Волонцевич, Е. А. Веретенников // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №2/7 (50). – С. 25-27.

Bibliography (transliterated): **1.** Analiz planetarnyh korobok peredach transportnyh i tjagovyh mashin / Filichkin N. V. Uchebnoe posobie. Kompjuternaja versija, ispravlennaja i dopolnennaja. – Cheljabinsk : Izd. JuUrGU, 2008. – 178 s. **2.** Sharipov V. M. Planetarnye korobki peredach kolesnyh i gusenichnyh mashin / Sharipov V. M., Krumboldt L. N., Marinkin A. P. Pod obshh. red. V. M. Sharipova. – M. : MGТУ «МАМИ», 2000. – 142 s. **3.** Krasnenkov V. I., Vashec A. D. Proektirovanie planetarnyh mehanizmov transportnyh mashin. – M. : Mashinostroenie. – 1986. – 272 s. **4.** Kudrjavcev V. N. Planetarnye peredachi : Spravochnik / Kudrjavcev V. N., Kirdjashev Ju. N. – L. : Mashinostroenie, 1977. – 536 s. **5.** Shelomov V. B. Struturnyj sintez kinematičeskikh shem planetarnyh korobok / V. B. Shelomov // SPb STU. – 2010. – №1. Т8. – S. 52-61. **6.** Melnikov O. A. Sintez kinematičeskikh shem planetarnyh korobok peredach so sdvoennymi satellitami dlja perspektivnyh gusenichnyh mashin : dis. kand. tehn. nauk : 05.05.03 / Melnikov Oleg Aleksandrovich. – Volgograd, 2004. – 192 s. **7.** Kuris Je. V. Osnovy novyh metodov kinematičeskogo rascheta korobok peredach : dis. kand. tehn. nauk : 05.03.01 / Kuris Jeduard Valerevich. – Rostov-na-Donu, 2009. – 203 s. **8.** Salamandra K. B. Sintez shem mnogoskorostnyh kombinirovannyh korobok peredach s nepodvizhnyimi i podvizhnyimi osjami zubchatyh koles : dis. kand. tehn. nauk : 05.02.18 / Salamandra Konstantin Borisovich. – Moskva, 2009. – 172 s. **9.** Sadykova A. Ja. Struturnyj sintez planetarnyh zubchatyh korobok peredach s odnovencovymi satellitami : dis. kand. tehn. nauk : 05.02.18 / Sadykova Anna Jakovlevna. – Ufa, 2006. – 167 s. **10.** Realizacija volnovogo algoritma dlja opredelenija krachajshogo marshruta na ploskosti pri modelirovanii trass s prepjatstvijami / A. S. Kozadaev, E. V. Dubovickij // Vestnik TGU, – Т.15, – Вып. 6, 2010. **11.** К вопросу о количественных критериях качества кинематических схем планетарных коробок передач / Д. О. Волонцевич, Е. О. Веретенников, С. С. Пасичный // Вісник НТУ "ХПІ", Збірник наукових праць. Серія : Транспортне машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», – 2013. – №31(1004). – С. 105-110. **12.** Волонцевич Д. О. К вопросу разбивки передаточных отношений бортовых планетарных коробок передач гусеничных машин / Д. О. Волонцевич, Е. А. Веретенников // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №2/7 (50). – С. 25-27.

Надійшла (received) 20.03.2014