

УДК 629.01

Р.В. Зінько

Національний університет "Львівська політехніка"

## ВИКОРИСТАННЯ ГРАФІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ РОБОТИ РОЗЧЛЕНОВАНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

*Запропоновано покращити роботу транспортних засобів шляхом розчленування їх основних мас тягово-зчипними пристроями (ТЗП). В конструкції ТЗП поєднано поступальна та оберտальна кінематичні пари. Запропоновано використання графів при дослідженні роботи розчленованих транспортних засобів (РТЗ) ТЗП. Розрахункова схема РТЗ формується на основі графа структури конструктивної схеми цієї машини. Далі записується граф структури рівнів узагальнених координат математичної моделі. Це дозволяє формувати математичну модель роботи РТЗ ТЗП саме такою, яка максимально пристосована для виконання поставлених завдань досліджень. Проведене комп'ютерне моделювання роботи РТЗ довело ефективність запропонованого конструкторського рішення.*

*Ключові слова: транспортний засіб, розчленування основних мас, тягово-зчипний пристрій, узагальнені координати; граф структури конструктивної схеми машини; граф структури рівнів узагальнених координат, комп'ютерний експеримент.*

**Вступ.** При створенні нових зразків машин доцільно використовувати математичні моделі їх роботи, що дозволяє ощадливо використовувати ресурси і час оскільки нема потреби виготовляти експериментальні зразки з метою перевірки роботи окремих елементів чи агрегатів нових машин. Проведення комп'ютерного експерименту дає можливість повніше дослідити особливості роботи проектованої машини. Разом з тим для проведення комп'ютерних експериментів потрібні відповідного рівня та якості математичні моделі роботи машин, що проектуються.

**Аналіз останніх досліджень.** Для полегшення праці конструкторів та дослідників розробляються програмні середовища, які дозволяють швидше та ефективніше розв'язувати типові задачі проектування нових машин та обладнання. Так програмне середовище Cruise [1] дозволяє моделювати різні режими руху автомобілів з різним конструктивними схемами трансмісії. Для роботи таких програм достатньо процесора класу Pentium. Neweul 83 [2] (для здійснення математичного моделювання зі змінами степенів вільності елементів системи і характеристик нелінійності); Дуна 3D [3], Pam-Crash [4] і Radioss [5] (для дослідження коливань автомобіля, безпеки і структурної оптимізації); Optim [6] (для дослідження стійкості та керованості руху автомобіля чи автопоїзда); для вирішення різних питань динаміки та динамічного аналізу конструкції колісної системи використовують різноманітні програмні продукти – пакети завершеного елементного аналізу (Ansys, Nastran), або пакети аналізу кінематики механізмів (Adams), широко застосовують також продукти Imita, Compact, Design Studio, Unigraphics, Most-7.2, Euler та інші [6-8].

Разом з тим, у програмних середовищах можна досліджувати типові режими чи процеси. У випадку нових зразків техніки знову ж таки потрібно в них закладати нові математичні моделі, що відповідають новому продукту. Вибір рівня точності та деталізації описуваних процесів залишається актуальною проблемою.

**Мета статті.** На прикладі розчленованого транспортного засобу показати використання графів для формування саме таких математичних моделей його роботи, які максимально пристосовані до виконання поставлених завдань конкретного дослідження.

**Основний матеріал.** На основі проведеного огляду можливих варіантів розчленування основних частин транспортних засобів, що рухаються плоскопаралельно у вертикальній повздовжній площині. [9-10] можна запропонувати поєднання цих основних частин РТЗ за допомогою ТЗП. Прикладом може бути пружне зчеплення автотягача з причепом або напівпричепом (рис. 1) за допомогою ТЗП (рис. 2,3), який складається з поступальної пари та пари обертання [11].

Побудуємо кінематичну схему РТЗ (рис. 4) з використанням графів його структури [12]. Під графом структури конструктивної схеми машини розуміємо такий граф, який показує зв'язки елементів машини з урахуванням її будови і зовнішніх впливів. Елемент схеми – жорстке інерційне тіло різноманітного конструктивного змісту – відображається кружком; жорсткий кінематичний зв'язок між двома елементами – прямою лінією, пружний зв'язок – хвилястою.

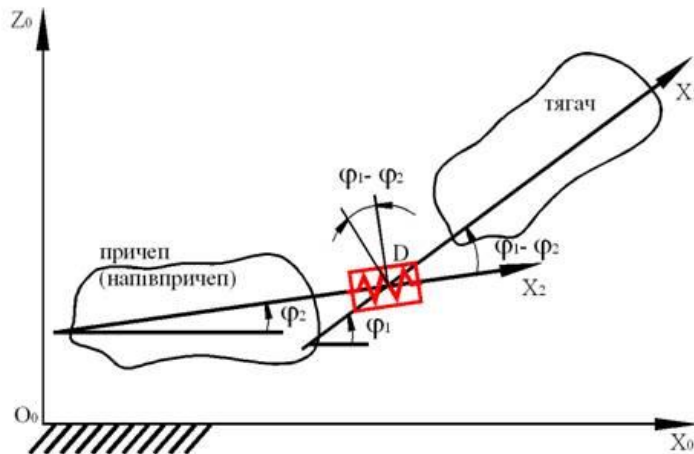


Рис. 1. Приклад РТЗ «Автотягач - прицеп (напівприцеп)» з ТЗП, що рухається у нерухомій вертикальній площині:  $X_0O_0Z_0$  – нерухома вертикальна поздовжня площина руху РТЗ; D – тягово-зчпний пристрій.

Для формування математичної моделі роботи РТЗ ТЗП саме такою, яка максимально пристосована для виконання поставлених завдань конкретного дослідження скористаємося графом структури рівнів узагальнених координат математичної моделі [12]. Під графом структури рівнів узагальнених координат математичної моделі розуміємо такий граф, який показує перелік узагальнених координат у математичній моделі і структуру їх рівнів. Для відображення структури рівнів узагальнених координат їх розміщують за рівнями і позначають ці рівні послідовно знизу вгору, починаючи з нульового; на одному рівні розташовані узагальнені координати однакового фізичного змісту.

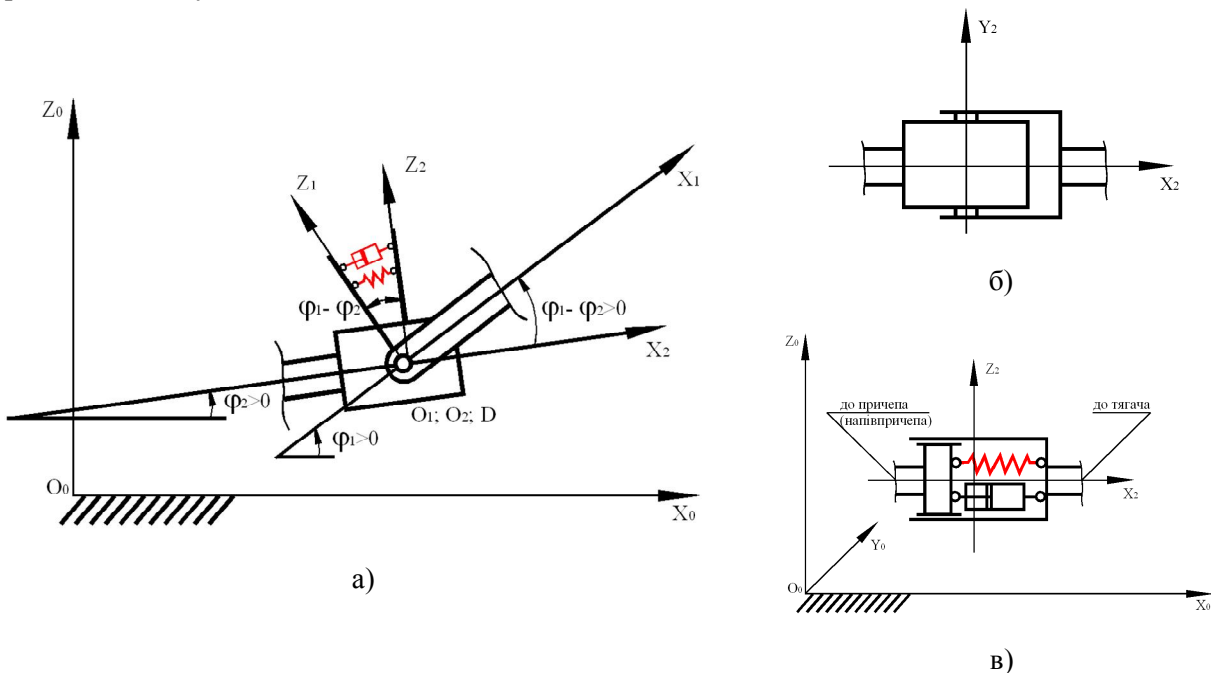


Рис. 2. Конструктивна схема загального випадку ТЗП при русі РТЗ у вертикальній поздовжній площині: а, б – проєкції ТЗП; в – повздовжнє січення ТЗП.

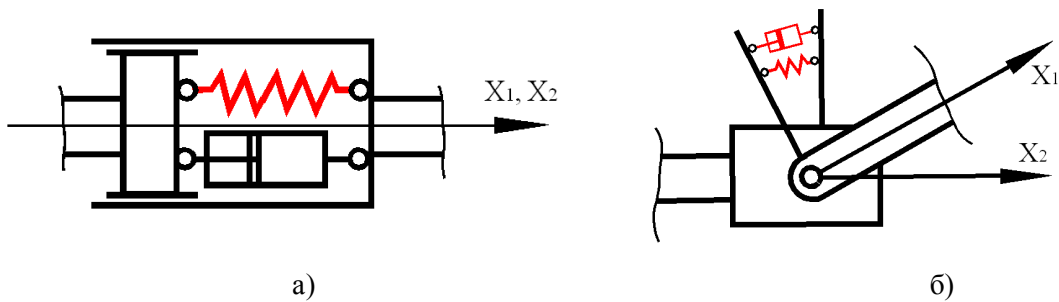


Рис. 3. Конструктивні схеми часткових випадків ТЗП при русі РТЗ у вертикальній поздовжній площині: а – поступальна пара; б – обертальна пара.

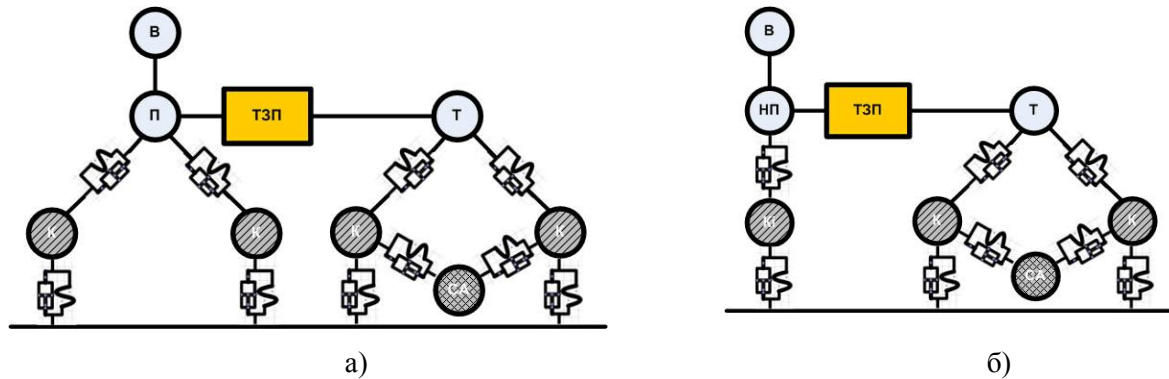





Рис. 4. Граф структури конструктивних схем РТЗ з причепом (а) і напівпричепом (б): Т – тягач; П – причеп; НП – напівпричеп; СА – силовий агрегат з трансмісією; ———— – пасивний жорсткий кінематичний зв'язок між елементами РТЗ;  – пасивний пружно-дисипативний кінематичний зв'язок між елементами РТЗ;  – елемент, на який діє зовнішнє кінематичне збурення (від профілю дороги);  – елемент, на який діє зовнішнє силове збурення (крутний момент, що діє на колінчастий вал двигуна).

Графи структури рівнів узагальнених координат, що наведені на рис. 5, дозволяють побудувати математичні моделі роботи РТЗ, які мають заданий вид ТЗП з врахуванням зовнішніх механічних характеристик їх силових агрегатів, трансмісії, якості покриття та профілів доріг, якими вони рухаються.

На основі загального рівняння динаміки механічної системи інерційних жорстких тіл записаного в узагальнених координатах [13] для РТЗ з графами структури конструктивних схем (рис. 4), в яких використано ТЗП загального випадку (рис. 2) і яким відповідає граф структури рівнів узагальнених координат математичної моделі роботи цих РТЗ (рис. 5а), можна побудувати саму математичну модель, яка у матричному запису має вигляд:

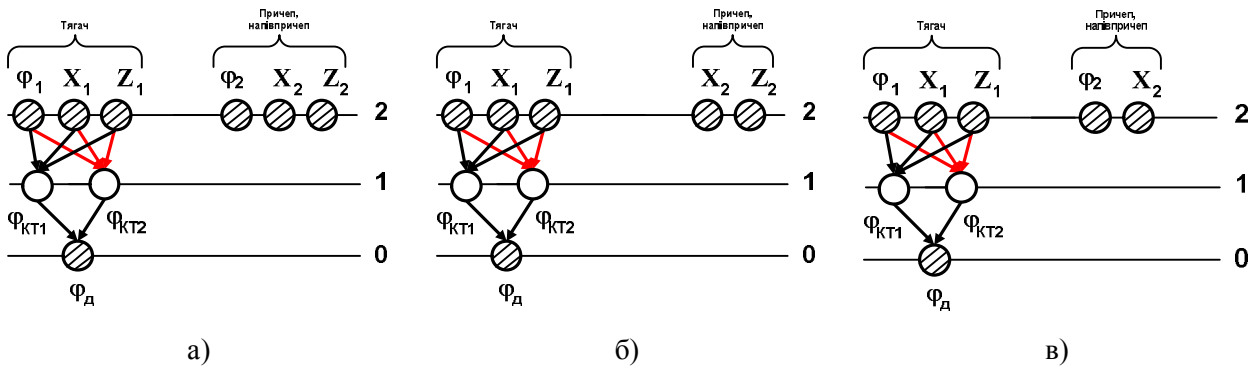


Рис. 5. Граф структури рівнів узагальнених координат математичної моделі роботи РТЗ з ТЗП, що мають конструктивні схеми загального та часткових випадків: а – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.2; б – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.3а; в – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.3б;  $\varphi_0$  – кут повороту вихідного валу силового агрегату приведенного до напів-осі ведучого колеса тягача;  $\varphi_{KT1}$ ,  $\varphi_{KT2}$  – кути повороту напівосей ведучих коліс тягача;  $X_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $Z_i$   $i=1,2$  – координати початків  $O_i$  систем координат  $X_i O_i Z_i$ , що жорстко пов'язані з корпусом тягача ( $i=1$ ) і рамою напівпричепа ( $i=2$ ); 0, 1, 2 - номери рівнів узагальнених координат математичної моделі РТЗ.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{19} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{91} & \dots & a_{99} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{Z}_1 \\ \ddot{\varphi}_1 \\ \dot{X} \\ \ddot{Z}_2 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_{KT1} \\ \ddot{\varphi}_{KT2} \\ \ddot{\varphi}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_9 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Тобто математична модель роботи РТЗ, що побудована з використанням графів рис. 5а, має дев'ять звичайних диференціальних рівнянь другого порядку. За допомогою цієї математичної моделі можна досліджувати вплив на ефективність роботи РТЗ:

- 1 – зовнішньої швидкісної характеристики двигуна, параметрів трансмісії.
- 2 – характеристик складових трансмісії, якості покриття та профілю дороги.
- 3 – вплив вагових та геометричних характеристик вантажу.
- 4 – пружно-демпфуючих характеристик підвіски тягача та причепа (напівпричепа).
- 5 – характеристик ТЗП.
- 6 – чинників, що впливають на паливну ощадливість.

Як видно з перелічених можливостей математичної моделі, що будується на графах структури рівнів узагальнених координат рисунку 5, вона достатньо потужна і має багато можливостей моделювати реальні процеси експлуатації РТЗ. Недоліком такої математичної моделі є її багатопараметричність та громіздкість.

У випадку, коли необхідно дослідити окремі сторони роботи РТЗ або роботу їх окремих складових, доцільно будувати математичні моделі на базі часткових випадків графів структури конструктивних схем РТЗ (рис. 4) та графів структури рівнів узагальнених координат математичної моделі роботи РТЗ (рис. 5). Так, коли не досліджується вплив трансмісії і двигуна РТЗ на його роботу, доцільно будувати математичної моделі роботи РТЗ з різними ТЗП на базі часткових випадків графів структури рівнів узагальнених координат, які представлені на рис. 6. Ці математичні моделі не спроможні моделювати рушення РТЗ та переключення передач коробки передач під час їх руху, але максимально пристосовані до виконання поставлених завдань конкретного дослідження, тобто вони простіші у користуванні при дослідженні роботи РТЗ у русі на певній, незмінній передачі коробки передач.

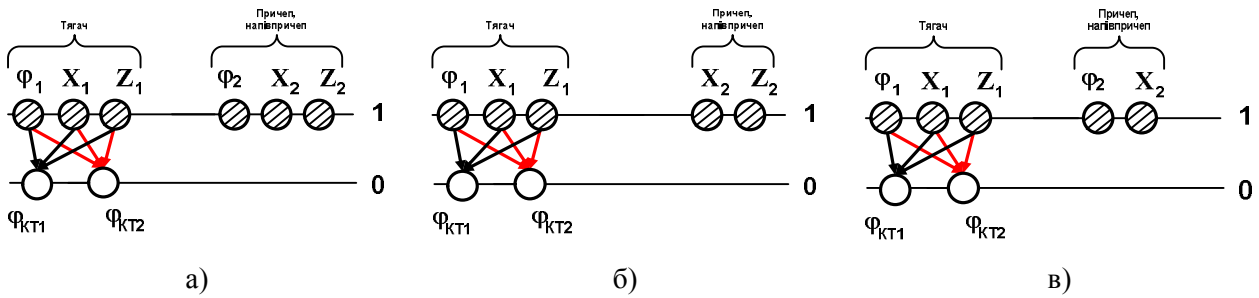


Рис. 6. Графи структури рівнів узагальнених координат математичної моделі роботи РТЗ з різними ТЗП у русі на певній, незмінній передачі коробки передач: а – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.2; б – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.3а; в – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.3б.

Дослідження роботи РТЗ з різними ТЗП при русі тягача з наперед заданою швидкістю доцільно проводити за допомогою математичних моделей, що побудовані на базі часткових випадків графів структури рівнів узагальнених координат, які представлені на рис. 7. Вони не спроможні моделювати вплив роботи двигуна та трансмісії тягача на рух РТЗ, але максимально пристосовані до виконання поставлених завдань конкретного дослідження.

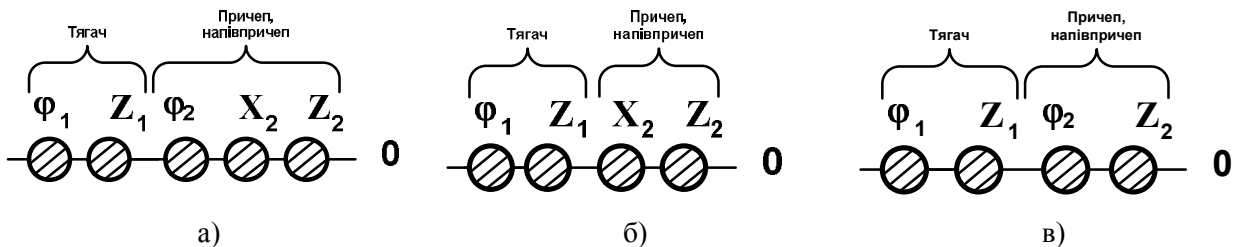


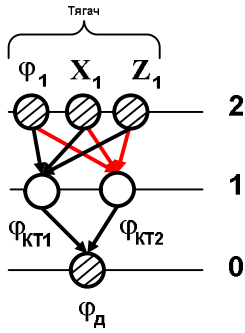
Рис. 7. Граф структури рівнів узагальнених координат математичної моделі роботи РТЗ з різними ТЗП при русі тягача з наперед заданою швидкістю : а – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.2; б – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.3а; в – відповідно до конструктивної схеми ТЗП рис.3б

Математична модель роботи РТЗ при русі тягача з наперед заданою швидкістю з ТЗП конструктивної схеми (рис. 3б), на основі графа структури рівнів узагальнених координат (рис.7,в) матиме вигляд:

$$\begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{25} & a_{26} \\ a_{32} & a_{33} & a_{35} & a_{36} \\ a_{52} & a_{53} & a_{55} & a_{56} \\ a_{62} & a_{63} & a_{63} & a_{66} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \dot{Z}_1 \\ \ddot{\phi}_1 \\ \dot{Z}_2 \\ \ddot{\phi}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_2 \\ Q_3 \\ Q_5 \\ Q_6 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Дослідження автономної роботи тягача РТЗ доцільно проводити за допомогою математичної моделі, що побудована на базі часткового випадку графа структури рівнів узагальнених координат, які представлені на рис. 8.

Ілюстрацією використання графів при побудові математичної моделі роботи РТЗ, яка максимально пристосована до виконання поставлених завдань конкретного дослідження може бути приклад дослідження роботи легкового автомобіля з напівприцепом, які мають ТЗП, представлений на рис.2.



$$\begin{matrix}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{17} & a_{18} & a_{19} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{27} & a_{28} & a_{29} \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{37} & a_{38} & a_{39} \\
 a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{77} & a_{78} & a_{79} \\
 a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{87} & a_{88} & a_{89} \\
 a_{91} & a_{92} & a_{93} & a_{97} & a_{98} & a_{99}
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 \ddot{X} \\
 \ddot{Z}_1 \\
 \ddot{\varphi}_1 \\
 \ddot{\varphi}_{КТ1} \\
 \ddot{\varphi}_{КТ2} \\
 \ddot{\varphi}_d
 \end{matrix}
 =
 \begin{matrix}
 Q_1 \\
 Q_2 \\
 Q_3 \\
 Q_7 \\
 Q_8 \\
 Q_9
 \end{matrix}
 \quad (3)$$

Рис. 8. Граф структури рівнів узагальнених координат та математична модель автономної роботи тягача РТЗ

Надалі використовувалися загально прийняті для досліджень функціонування РТЗ припущення [13]:

1. Корпус автомобіля-тягача, напівпричепи, вантаж – жорсткі інерційні тіла.
2. Інерційність елементів привода ходової частини автомобіля- тягача приведена до ведучих коліс і розподілена пропорційно до розподілу між ними крутного моменту від силового агрегату.
3. Колеса мають радіальну та тангенціальну податливість.
4. Обмежуючи дослідження РТЗ випадком його неусталеного руху у вертикальній поздовжній площині, розрахункову схему вважаємо плоскою.
5. Величини сил опору руху РТЗ функціонально залежать від сил притискання його коліс до дороги [14]. Сумарний момент гальм РТЗ при його гальмуванні функціонально залежить від часу.
6. Негоризонтальний і непрямолінійний макропрофіль дороги є функцією поздовжньої координати  ${}^0X_d$  нерухомої системи  $X_0O_0Z_0$ , а мікропрофіль дороги має ознаки профілів типових доріг або бездоріжжя.
7. Механічна характеристика силового агрегату автомобіля-тягача побудована на базі тягових характеристик двигунів легкового автомобіля.

На підставі четвертого припущення було вибрано такі плоскі системи координат (рис. 9):

- система координат  $X_0O_0Z_0$  – нерухома, вісь  $Z_0$  паралельна до лінії дії сили тяжіння і протилежно до неї спрямована, вісь  $X_0$  – перпендикулярна до осі  $Z_0$  і спрямована таким чином, що утворюється правостороння система координат; приймається, що рух РТЗ спрямований у бік збільшення  $X_0$ .

- система координат  $X_1O_1Z_1$  – рухома система, що жорстко пов'язана з шасі автомобіля-тягача і лежить у площині  $X_0O_0Z_0$ . Початок  $O_1$  цієї системи може змінювати свої координати  ${}^0X_{01}, {}^0Z_{01}$ , в нерухомій координатній системі  $X_0O_0Z_0$ , а осі  $O_1X_1, O_1Z_1$  можуть повертатися на кут  ${}^0\varphi_{01}$  відносно осей нерухомої системи. При повороті осей проти годинникової стрілки приймаємо кут  ${}^0\varphi_{01}$  додатним; за початок відліку кута  ${}^0\varphi_{01}$  приймаємо випадок, коли осі  $O_1X_1, O_1Z_1$  відповідно паралельні осям  $O_0X_0, O_0Z_0$ . Напрямок осей  $O_1X_1, O_1Z_1$  збігається з напрямком осей  $O_0X_0, O_0Z_0$ .

Система координат  $X_2O_2Z_2$  – рухома система, що жорстко пов'язана з рамою напівпричепи РТЗ і лежить у площині  $X_0O_0Z_0$ . Початок  $O_2$  цієї координатної системи може змінювати свої координати  $O_2X_2, O_2Z_2$  в нерухомій координатній системі  $X_0O_0Z_0$ . Напрямок осей  $O_2X_2, O_2Z_2$  збігається з напрямком відповідних осей  $O_0X_0, O_0Z_0$ .

На схемі (рис. 8) позначені: початки  $O_1, O_2$  рухомих координатних систем  $X_1O_1Z_1, X_2O_2Z_2$ ; центри мас  $C_{ch}, C_k, C_i$  автомобіля-тягача, напівпричепа, вантажу; кути  ${}^0\varphi_{01}, {}^0\varphi_{01}$  повороту рухомих координатних систем. Автомобіль-тягач та напівприцеп РТЗ рухаються плоскопаралельно в нерухомій системі координат  $X_0O_0Z_0$ .

Цьому РТЗ відповідає граф структури конструктивної схеми, представлений на рис.4б, та граф структури рівнів узагальнених координат, представлений на рис.6а (або 7а).

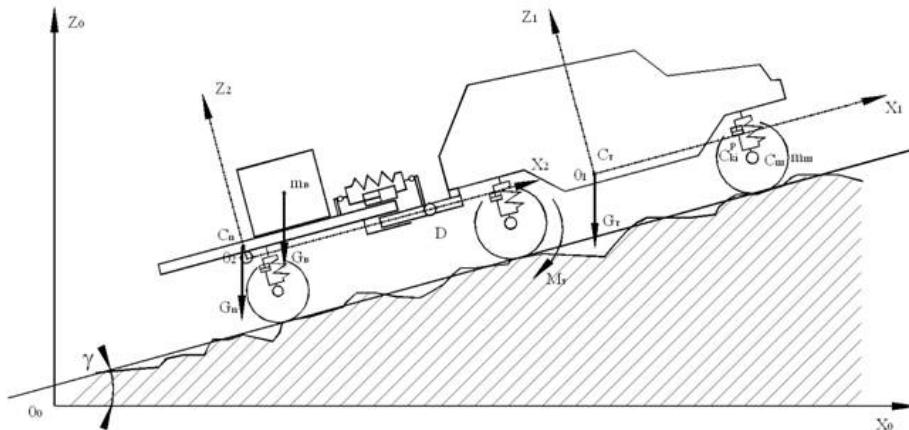


Рис. 9. Розрахункова схема РТЗ «легковий автомобіль – напівприцеп»

Для запису рівнянь руху інерційних елементів розрахункової схеми РТЗ використовувалося загальне рівняння динаміки механічної системи у формі рівняння Лагранжа II-го роду [13]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad i = 1 \dots n, \quad (4)$$

де  $T$  – сумарна кінетична енергія інерційних елементів механічної системи;

$q_i, \dot{q}_i$  –  $i$ -та узагальнена координата та швидкість її зміни в часі;

$Q_i$  –  $i$ -та узагальнена сила;

$n$  – кількість ступенів вільності механічної системи.

Математична модель роботи РТЗ (див. рис.9), представляє собою системи звичайних диференціальних рівнянь другого порядку. В математичні моделі додатково до невідомих узагальнених координат та їх похідних за часом входять відомими параметрами та заданими функціями:

1) геометричні характеристики транспортного засобу: положення центрів мас тягача, напівпричепа (причепа), вантажів; розташування опор шасі тягача та рами напівпричепа; координати центра шарніра, що з'єднує напівприцеп (причепа) з тягачем, розміри у вільному стані пружних опор тягача та напівпричепа;

2) інерційні характеристики транспортного засобу: маси та моменту інерції тягача, напівпричепа (причепа), вантажів, ведучих коліс разом з частиною трансмісії;

3) пружні та демпфуючі властивості опор транспортного засобу: тягача та напівпричепа (причепа);

4) механічні характеристики приводу двигуна та гальм коліс транспортного засобу;

5) геометричні характеристики дороги та якість її покриття.

Математичне моделювання проводилося для системи легкового автомобіля VW Golf 4 з причепом за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення *MathCAD 2001* [15]. Розв'язок системи диференціальних рівнянь отримано методом Рунге-Кутти з адаптивним вибором кроку (вбудована функція *Rkadapt*).

Як один з елементів комп'ютерного моделювання прораховувався варіант переїзду автомобіля через перешкоду типу "сходінка". Залежність від часу  $t$  сил  $P_i(t)$ , що діють на ланки автомобіль і причеп може бути записана аналітично у вигляді



$$p_i(t) = m_i g \cdot \left[ H\left(t - \frac{B_0}{v}\right) H\left(\frac{B_0}{v} + \tau - t\right) + H\left(t - \frac{B_1}{v} - \tau\right) H\left(\frac{B_1}{v} + 2\tau - t\right) \right], \quad (5)$$

де  $m_i$  — маси ланок;  $\tau$  — час переїзду одиночної перешкоди; матриця задає довжини елементів легкового автомобіля зчленованого з причепом;  $-$  прискорення вільного падіння;  $H(x)$  — функція Хевісайда, визначена звичайним чином.

Для дослідження динамічних властивостей системи в залежності від пружної характеристики зчпного пристрою  $c(s)$  варіювалось значення параметрів  $a$  (величина попереднього підтискання) і  $b$  (величина зазору).

У разі лінійної характеристики пружного елемента (рис.10а, 11а,  $a = 0$ ,  $b = 0$ ) власні коливання відбуваються з постійною частотою, амплітуди коливань не впливають на величину власних частот; власні частоти залежать тільки від коефіцієнту пружності і приведеної маси автомобіля і причепа  $\frac{m_0 m_1}{m_0 + m_1}$  [14]. Тертя в ТЗП може незначно зменшувати частоту поздовжніх коливань ланок «автомобіль-прицеп», однак експоненційно зменшує їх амплітуду.

**Висновки.** Спосіб розчленування основної маси транспортних засобів не тільки зменшує максимальну потужність, необхідну при рушанні чи гальмуванні в процесі руху. Він також дозволяє зменшити пікові динамічні навантаження в трансмісії, понизити вібронавантаженість, підвищити плавність руху і, відповідно, комфортабельність, довговічність та надійність машин. Покращення цих показників можливе при виборі і забезпеченні відповідних законів руху розчленованих мас.

1. [https://www.avl.com/c/document\\_library/](https://www.avl.com/c/document_library/) Перевірено 11.03.2012.
2. Neweul-M2. Symbolic multibody simulation in Matlab. [http://www.itm.uni-stuttgart.de/research/neweul/media/Neweulm2\\_Manual.pdf](http://www.itm.uni-stuttgart.de/research/neweul/media/Neweulm2_Manual.pdf) Перевірено 10.03.2012.
3. DYNA3D. [https://www-eng.lnl.gov/mdg/mdg\\_codes\\_dyna3d.html](https://www-eng.lnl.gov/mdg/mdg_codes_dyna3d.html). Перевірено 10.03.2012.
4. Pam-Crash. <http://en.wikipedia.org/wiki/Pam-Crash>. Перевірено 10.03.2012.
5. RADIOSS 9.0 – HyperCrash 9.0 – Analysis Set Up . <http://www.altairuniversity.com/2011/04/15/radioss-9-0-hypercrash-9-0-%E2%80%93-analysis-set-up-tutorial/>. Перевірено 10.03.2012.
6. Georg R. Vehicle modeling by subsystems //J. Braz. Soc. Mech. Sci&Eng. – 2006. – vol.24, №4 – P.430-442.
7. Горобцов А.С. Комплекс ФРУНД – инструмент исследования динамики автомобиля /А.С. Горобцов, С.К. Карцов, Р.П. Кушвид //Автомобильная промышленность. – 2005. – № 4. – С.27-28.
8. Возможные области применения EULER. <http://www.euler.ru/index.php/praxis>. Перевірено 10.12.2011.
9. Альгин В.Б., Павловский В.Я., Поддубко С.Н. Динамика трансмиссии автомобиля и трактора / В.Б. Альгин, В.Я. Павловский, С.Н. Поддубко.; под ред. И.С. Цитовича. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 214 с.
10. Черевко Ю.М., Королевич Л.М., Зінько Р.В. Експериментальне дослідження характеристик автомобіля з пружно-демпфуючою системою // Вісник ДІАТ. – 2008. - №4. – С.56-64.
11. Библюк. Н.І., Зінько Р.В., Дадак Р.М., Маковейчук О.М. Залежність динамічних властивостей дволанкового автопотяга від пружної характеристики зчпного пристрою. // Науковий вісник НЛТУУ: збірник науково-технічних праць. – Львів: НЛТУУ. – 2005, вип.15.4. С. 90–95.
12. Зінько Р.В. Методика використання графів при дослідженні роботи машини з гусеничним рушієм // Науковий вісник НЛТУУ: збірник науково-технічних праць. – Львів: НЛТУУ. – 2011, вип.21.13. С. 117 – 122.
13. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний [Текст] / Бидерман В.Л. – М. : Высш. шк., 1980. – 408 с/
14. Основы теории колебаний автомобиля при торможении и ее приложения: (Монография) / А.А. Енаев, Н.Н. Яценко. –М.: Машиностроение, 2002. – 340 с.
15. Mathcad. <http://www.mathcad.com.ua/>. Перевірено 11.17.2011.



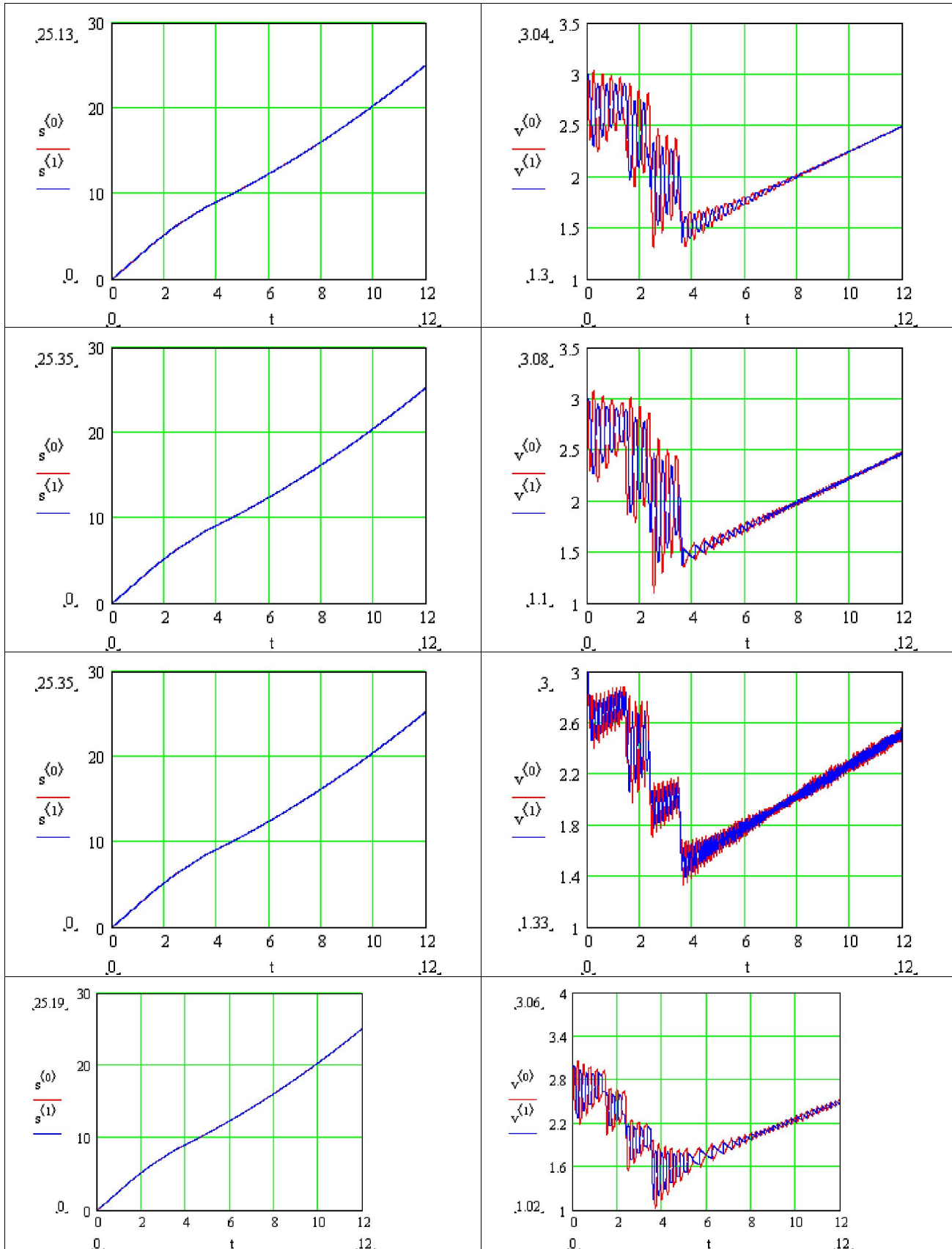


Рис.10. Графіки залежностей пройденого шляху  $s$ , м (зліва) та швидкостей (справа)  $v$ , м/с обох ланок «автомобіль-причеп» як функції часу  $t$ .

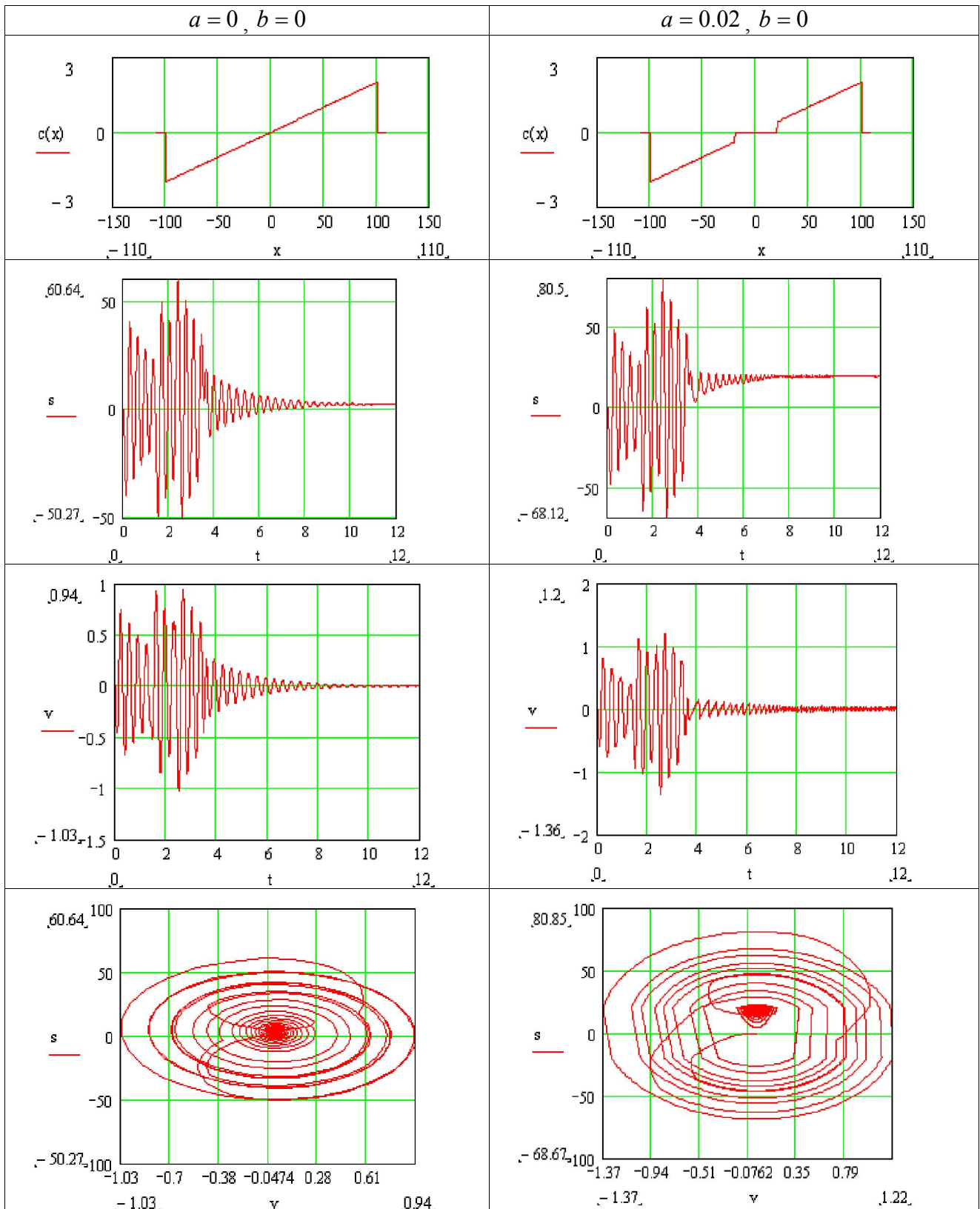


Рис.11. Згори вниз:

- залежність пружної характеристики  $c(x)$  від зміщення  $x$ , мм;
- залежність відносного переміщення ланок «автомобіль-прицеп»  $s$ , м від часу  $t$ , с
- залежність відносної швидкості ланок «автомобіль-прицеп»  $v$ , м/с від часу  $t$ , с;
- залежність відносної швидкості від відносного переміщення (фазова діаграма)

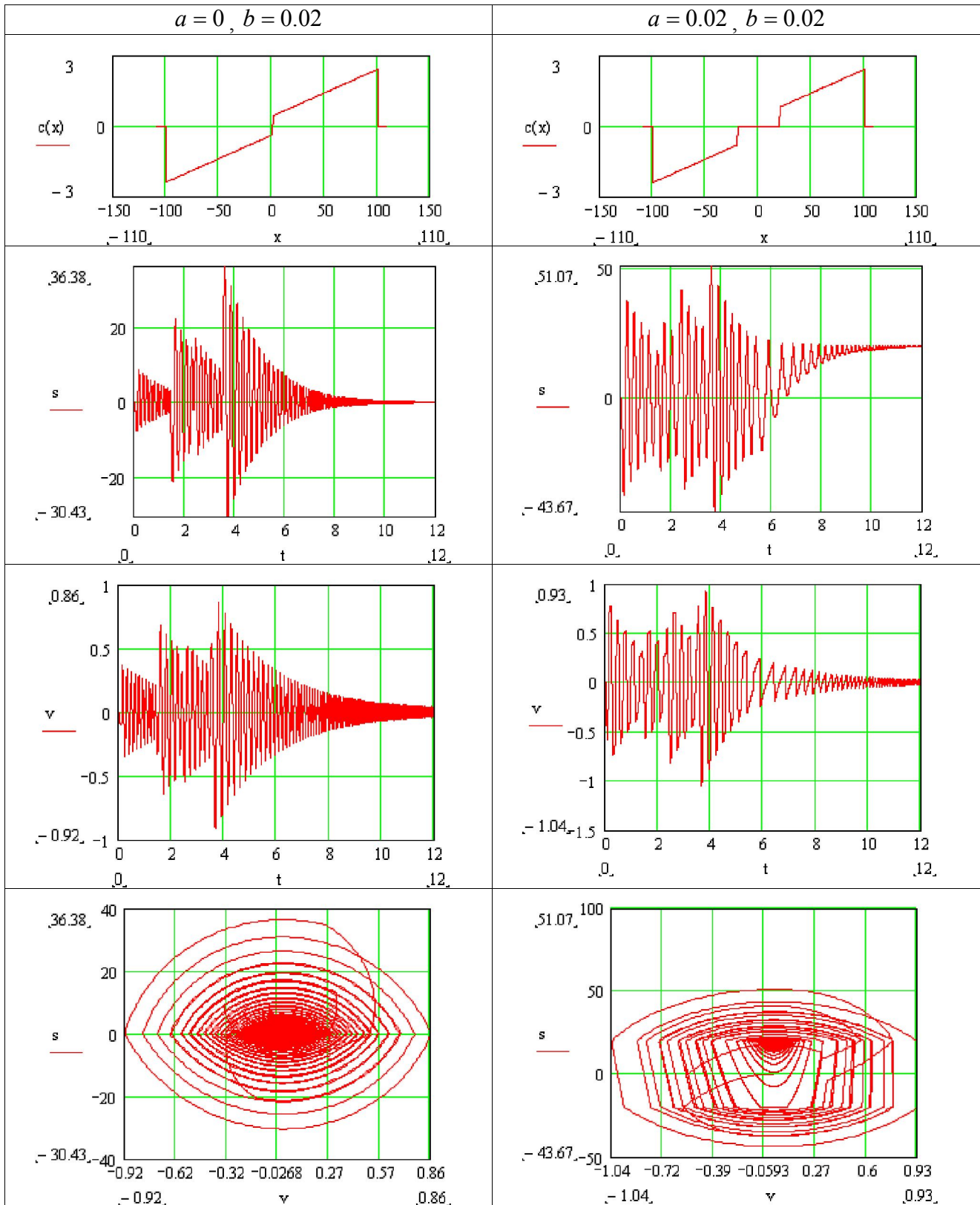


Рис.11 (продовження). Згори вниз:

- залежність пружної характеристики  $c(x)$  від зміщення  $x$ , мм;
- залежність відносного переміщення ланок «автомобіль-причеп»  $s$ , м від часу  $t$ , с
- залежність відносної швидкості ланок «автомобіль-причеп»  $v$ , м/с від часу  $t$ , с;
- залежність відносної швидкості від відносного переміщення (фазова діаграма)