

УДК 65-235

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СИНХРОНІЗАЦІЇ У ДЕСЯТИСТУПІНЧАСТІЙ КОРОБЦІ ПЕРЕДАЧ ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ

**В.О. Богомолів, професор, д.т.н., В.І. Клименко, професор, к.т.н., М.Г. Михалевич,  
доцент, к.т.н., М.М. Сільченко, аспірант, ХНАДУ**

*Анотація.* Розглянуто різні комбінації перемикання синхронізаторів під час зміни передач у десятиступінчастій коробці передач.

*Ключові слова:* час синхронізації, питома робота тертя, коробка передач, дільник.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СИНХРОНИЗАЦИИ В ДЕСЯТИСТУПЕНЧАТОЙ КОРОБКЕ ПЕРЕДАЧ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

**В.А. Богомолів, професор, д.т.н., В.И. Клименко, професор, к.т.н.,  
Н.Г. Михалевич, доцент, к.т.н., Н.Н. Сильченко, аспірант, ХНАДУ**

*Аннотация.* Рассмотрены различные комбинации переключения синхронизаторов при смене передач в десятиступенчатой коробке передач.

*Ключевые слова:* время синхронизации, удельная работа трения, коробка передач, делитель.

## MODELING OF OPERATION PROCEDURE OF SYNCHRONIZATION IN TEN-SPEED GEAR BOX OF TRUCKS

**V. Bogomolov, Professor, Doctor of Technical Science, V. Klimenko, Professor,  
Candidate of Technical Science, N. Mykhalevych, Candidate of Technical Science,  
N. Sylchenko, postgraduate, KhNAHU**

*Abstract.* Different combinations of synchronizers switching at clutching in the ten-speed gear box are considered.

*Key words:* synchronization time, specific friction work, gear box, divisor.

### Вступ

Зараз зазнає суттєвих змін найбільш консервативна складова автомобіля – трансмісія. Розвиток технологій дозволяє втілити найбільш амбіційні ідеї минулих років. Вдосконалюються також електронні системи керування трансмісією.

### Аналіз публікацій

Так, наприклад, фірма BMW задіяла GPS-навігацію у керуванні автоматичною коробкою передач [1]. Деякі виробники вантажних автомобілів почали застосовувати гібридну

трансмісією, яка традиційно була виключно атрибутом легкового автомобіля [2, 3]. Серед легкових та вантажних автомобілів достатньо поширеною є роботизована коробка передач [3]. Завдяки збереженню механічної силової частини коробки передач, залишається доволі низькою вартість агрегату та високий ККД. Перемикання передач відбувається завдяки додатковим пристроям, керованим електронним блоком. Виконавчі пристрої мають досить різноманітну будову та принципову конструкцію. Наприклад, такі пристрої за задіяним джерелом живлення бувають електропневматичні, електрогідравлічні та електромеханічні.

**Мета та постановка задачі**

Метою дослідження є вивчення процесів, що відбуваються під час перемикання передач десятиступінчастої коробки у різних комбінаціях пересування синхронізаторів. Це дозволить раціонально побудувати не тільки алгоритм керування коробкою передач, а й виконавчий пристрій вибору передачі, звести до мінімуму кількість джерел енергії, що живить пристрій.

**Математична модель перемикання передач**

Моделювання процесу перемикання передачі складається з декількох варіантів перемикання: перемикання передачі в основній коробці без участі дільника; перемикання синхронізатора у дільнику без участі основної коробки передач; синхронне перемикання як у дільнику, так і у коробці передач.

Під час моделювання було введено наступні припущення: вимкнення передачі відбувається миттєво; моделювання починається з моменту вимкнення попередньої передачі (з моменту роз'єднання синхронізатора та шестерні попередньої передачі); динамічна стадія наростання зусилля на синхронізаторі відбувається за 0,15 с, згідно з експериментальними дослідженнями, що проводились на кафедрі автомобілів [4].

Моделювання робочих процесів, що відбуваються під час перемикання передач, можливе за наявності інформації про геометричні параметри шестерень та валів, моментів опору коченню у підшипниках та чисел зубів шестерень. Схему коробки передач із необхідними параметрами наведено на рис. 1.

Відповідно до розрахунків, наведених у другому розділі, у коробці існують режими перемикання передач, у яких використовується синхронізатор у коробці передач, синхронізатор у дільнику та режими, де обидва синхронізатори виконують перемикання передач. Розглянемо окремо ці режими перемикання. Під час перемикання передач у коробці передач відбувається вирівнювання швидкостей обертання синхронізатора та шестерні, на яку відбувається перемикання. Для ілюстрації процесів, що відбуваються під час перемикання, запишемо рівняння Лагранжа другого роду процесу перемикання передач у коробці передач у загальному вигляді

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q} \tag{1}$$

Кінетична енергія обертання елементів коробки передач та поступового руху транспортного засобу запишеться у вигляді

$$T = \frac{m_a \cdot V_a^2}{2} + \frac{J_{II} \cdot \omega_{II}^2}{2} \tag{2}$$

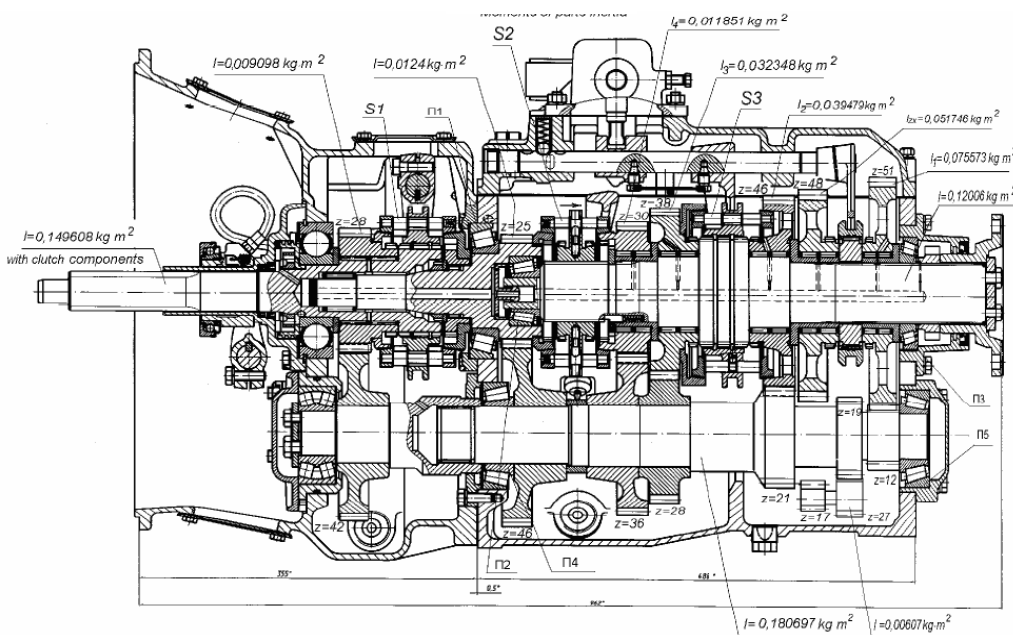


Рис. 1. Схема коробки передач із позначенням моментів інерції мас, що обертаються

Зміна потенційної енергії

$$\frac{\partial \Pi}{\partial q} = P_w + P_\psi \pm M_{\text{синхр}} \cdot \quad (3)$$

Рис. 2 ілюструє розрахункову схему ввімкнення передачі за допомогою одного синхронізатора. На рис. 3 наведено схему з вмикання передачі, яка потребує переміщення двох синхронізаторів за один рух важеля перемикачів передач.

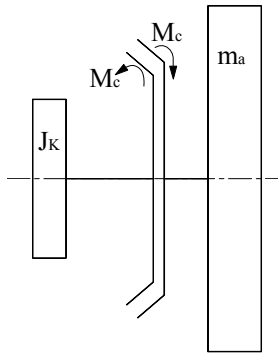


Рис. 2. Розрахункова схема перемикачів основною коробкою

На рис. 2 позначені:  $M_c$  – момент, який створює синхронізатор;  $m_a$  – маса, що імітує інерцію автомобіля;  $J_K$  – момент інерції, що імітує інерцію шестерень коробки передач. Позначення на рис. 3 співпадають із позначеннями на рис. 2. Додаткові позначення:  $M_{cd}$  – момент, який створює синхронізатор дільника;  $J_K$  – момент інерції, що імітує інерцію тяжких дисків зчеплення.

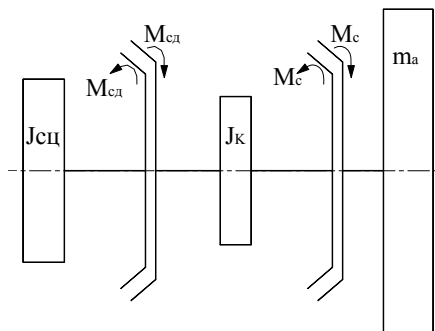


Рис. 3. Розрахункова схема синхронного перемикачів у коробці та дільнику

Система рівнянь, що описує процес ввімкнення передачі, складається з двох структурних складових: частини, що описує обертання шестерень і валів коробки передач, та

частини, що описує уповільнення транспортного засобу під час перемикачів з однієї передачі на іншу. Ланцюгом між двома частинами виступає момент, створений синхронізатором. Система рівнянь має вигляд

$$\left\{ \begin{aligned} j_x &= \frac{-P_w - P_\psi + M_{\text{синхр}} \cdot \text{sign}(\omega_{\text{ш}} - \omega_{\text{II}}) \cdot \frac{u_0}{r_k} - J_{\text{II}} \cdot \varepsilon_{\text{II}}}{m_a} \\ \varepsilon_{\text{II}} &= \frac{j_x \cdot u_0}{r_k} \\ \varepsilon_{\text{ш}} &= \frac{-M_{\text{тр}} + M_{\text{синхр}} \cdot \text{sign}(\omega_{\text{II}} - \omega_{\text{ш}}) - \sum (J_i \cdot \varepsilon_i)}{J_{\text{ш}}} \\ \varepsilon_i &= \varepsilon_{\text{ш}} \cdot u_i \\ \omega_{\text{II}} &= \frac{V_a \cdot u_0}{r_k} \\ \omega_{\text{ш}} &= \int \varepsilon_{\text{ш}} dt \\ \omega_{\text{ш}}^0 &= \frac{V_a \cdot u_0}{r_k} \cdot u_{\text{II} \rightarrow \text{ш}} \\ V_a^0 &= V_{\text{крj}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

де  $j_x$  – уповільнення транспортного засобу,  $\text{м/с}^2$ ;  $P_w$  – сила опору повітря, Н;  $M_{\text{синхр}}$  – момент, який створює синхронізатор, Н·м;  $\omega_{\text{ш}}$  – кутова швидкість шестерні відповідної передачі, на яку відбувається перемикачів,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\omega_{\text{II}}$  – кутова швидкість вторинного вала,  $\text{с}^{-1}$ ;  $J_{\text{II}}$  – момент інерції вторинного вала,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\varepsilon_{\text{II}}$  – кутове прискорення вторинного вала,  $\text{с}^{-2}$ ;  $r_k$  – радіус колеса, м;  $u_0$  – передавальне число головної передачі;  $\varepsilon_i$  – кутове прискорення  $i$ -тої шестерні коробки передач,  $\text{с}^{-2}$ ;  $\varepsilon_{\text{ш}}$  – кутове прискорення шестерні коробки передач, з якою зчеплюється синхронізатор,  $\text{с}^{-2}$ ;  $u_i$  – передавальне число від шестерні, з якою зчеплюється синхронізатор до  $i$ -тої шестерні;  $V_a$  – швидкість автомобіля,  $\text{км/год}$ ;  $V_a^0$  – початкова швидкість автомобіля,  $\text{км/год}$ ;  $\omega_{\text{ш}}^0$  – початкова кутова швидкість шестерні відповідної передачі, на яку відбувається перемикачів,  $\text{с}^{-1}$ ;  $u_{\text{II} \rightarrow \text{ш}}$  – передавальне число від вторинного вала до шестерні, на яку відбувається перемикачів під час ввімкнення попередньої передачі;  $V_{\text{крj}}$  – критична швидкість на попередній ввімкненій передачі,  $\text{км/год}$ ;  $m_a$  – маса автомобіля,  $\text{кг}$ ;  $J_i$  – момент інерції  $i$ -тої шестерні,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $J_{\text{ш}}$  – момент інерції шестерні, на яку відбу-

вається перемикання,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $M_{\text{тр}}$  – момент тертя підшипників коробки передач, Н·м.

Система рівнянь, що описує процес синхронного перемикання передачі у коробці та у дільнику, має вигляд (5).

$$\left\{ \begin{aligned} j_x &= \frac{-P_w - P_\psi + M_{\text{синхр}} \cdot \text{sign}(\omega_{\text{ш}} - \omega_{\text{п}}) \cdot \frac{u_0}{r_k} - J_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{п}}}{m_a} \\ \varepsilon_{\text{п}} &= \frac{j_x \cdot u_0}{r_k} \\ \varepsilon_{\text{ш}} &= \frac{-M_{\text{тр}} + M_{\text{синхр}} \cdot \text{sign}(\omega_{\text{п}} - \omega_{\text{ш}}) - \sum (J_i \cdot \varepsilon_i)}{J_{\text{ш}}} + \\ &+ \frac{M_{\text{синхрд}} \cdot \text{sign}(\omega_{\text{сц}} - \omega_{\text{шд}})}{J_{\text{ш}}} \\ \varepsilon_i &= \varepsilon_{\text{ш}} \cdot u_i \\ \omega_{\text{п}} &= \frac{V_a \cdot u_0}{r_k} \\ \omega_{\text{ш}} &= \int \varepsilon_{\text{ш}} dt \\ \varepsilon_{\text{сц}} &= \frac{-M_{\text{тр}} + M_{\text{синхрд}} \cdot \text{sign}(\omega_{\text{шд}} - \omega_{\text{сц}})}{J_{\text{сц}}} \\ \omega_{\text{сц}} &= \int \varepsilon_{\text{сц}} dt \\ \omega_{\text{шд}} &= \omega_{\text{ш}} \cdot u_i \\ \omega_{\text{ш}}^0 &= \frac{V_a \cdot u_0}{r_k} \cdot u_{\text{п} \rightarrow \text{ш}} \\ V_a^0 &= V_{\text{крп}} \\ \omega_{\text{сц}}^0 &= \frac{V_a^0 \cdot u_0}{r_k} \cdot u_{\text{п} \rightarrow \text{сц}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{\text{сц}}$  – кутове прискорення тяжних дисків зчеплення  $\text{с}^{-2}$ ;  $J_{\text{сц}}$  – момент інерції тяжних дисків,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\omega_{\text{сц}}$  – кутова швидкість тяжних дисків зчеплення  $\text{с}^{-1}$ ;  $\omega_{\text{шд}}$  – кутова швидкість тяжної шестерні, з якою зчіплюється синхронізатор дільника  $\text{с}^{-1}$ ;  $M_{\text{синхрд}}$  – момент, який створює синхронізатор дільника, Н·м;  $M_{\text{тр}}$  – момент тертя підшипників коробки передач, Н·м;  $\omega_{\text{сц}}^0$  – початкова кутова швидкість тяжних дисків зчеплення  $\text{с}^{-1}$ ;  $u_{\text{п} \rightarrow \text{сц}}$  – передавальне число від вторинного вала до тяжних дисків зчеплення під час ввімкнення попередньої передачі.

З огляду на частоту використання передач та припустиму питому роботу буксування, для кожної передачі існує значення моменту, що

створює синхронізатор, прийнятне для забезпечення необхідного часу служби синхронізатора. Значення припустимої роботи синхронізатора коливається від 0,5 до 0,2 МДж/м<sup>2</sup>. Більші значення відносяться до нижчих передач, а менші до – вищих. Значення допустимого моменту на кожній передачі наведено у табл. 1.

Таблиця 1 Параметри синхронізаторів

Номер передачі	Середній радіус тертя, мм	Ширина кільця синхронізатора, мм	Момент тертя синхронізатора, Н·м
Друга	92	17	137,2
Третя	92	15	67,0
Четверта	65	15	42,4
П'ята	57	15	25,7
Нижча дільника	63	17	35,6
Вища дільника	63	17	35,6

У ручному режимі водій прикладає до важеля перемикання передач ненормоване зусилля; оскільки він прикладає до важеля приблизно однакове зусилля, тому час синхронізації може відрізнитися як у більшу сторону, так і в меншу. Таку ж картину можна спостерігати і при керуванні коробкою передач електропневматичним механізмом. Функціональна схема суттєво обмежує можливість регулювання зусилля на синхронізаторі, оскільки для всіх передач використовується один силовий циліндр.

Таким чином пневматичний циліндр може забезпечити два рівні зусилля на синхронізаторі. Як правило, параметри силового циліндра обирають із міркувань забезпечення необхідного зусилля на нижчих передачах. У свою чергу вищі передачі знаходяться під дією занадто великої сили. Позитивною стороною цього стає зменшення часу синхронізації, а негативною – скорочення терміну служби синхронізаторів. При використанні електромеханічного виконавчого механізму регулювання зусилля дуже просто відбувається за допомогою обмеження струму в обмотці електродвигуна.

Вирішення системи рівнянь перемикання на вищі та нижчі передачі проілюстровано, відповідно, на рис. 4–7.

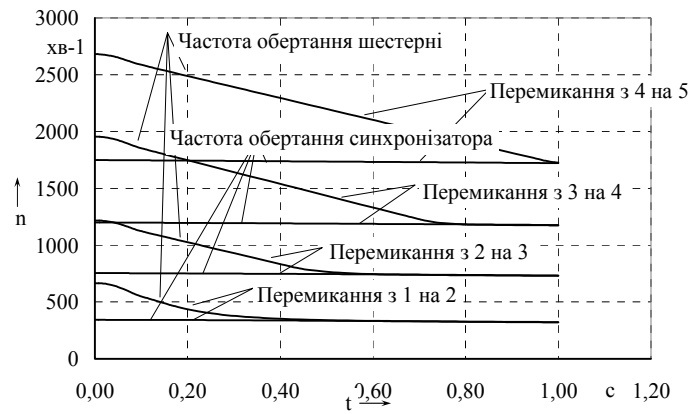


Рис. 4. Робочий процес перемикання з нижчої передачі на вищу



Рис. 5. Робочий процес перемикання з вищої передачі на нижчу

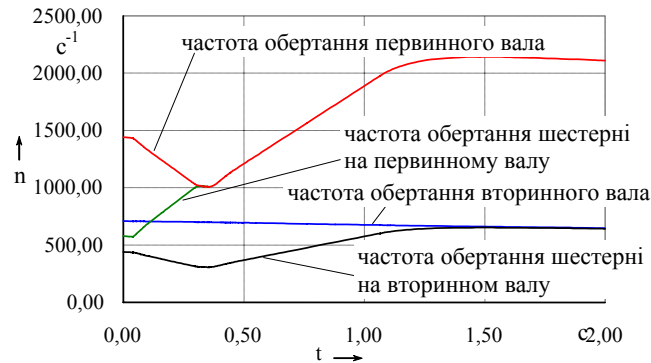


Рис. 6. Робочий процес з перемиканням у дільнику та наступним перемиканням з вищої передачі на нижчу у коробці передач

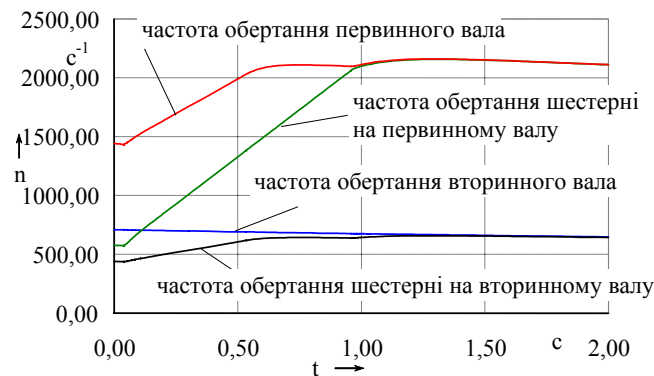


Рис. 7. Робочий процес перемикання з вищої передачі на нижчу із одночасним перемиканням у дільнику

На рисунках зображено час синхронізації при використанні електромеханічного привода з обмеженням зусилля у рамках допустимої величини.

Під час перемикання передач разом із дільником моделювались два варіанти роботи. Одночасне вимикання передач та перемикання передачі у коробці послідовно після переключення ступені у дільнику. Інтервал між початком ввімкнення 0,35 с (рис. 6). Другий варіант – одночасне перемикання передач у коробці та дільнику (рис. 7).

Із аналізу робочих процесів перемикання передач у двох режимах випливає, що час повного перемикання передач мало відрізняється один від одного. Час повного перемикання із урахуванням вимкнення та вмикання зчеплення, вимкнення передачі та переходу через нейтральне положення може складати 1,5–2 с. За цей час швидкість автомобіля зменшується пропорційно опору тиску та дорожньому опору.

Одним із найбільш простих та дієвих способів зменшити час синхронізації є збільшення зусилля на синхронізаторі. Одночасно, щоб зберегти ресурс синхронізатора, необхідно збільшити площу тертя, завдяки чому зменшується питома робота буксування. Робота, що витрачається на вирівнювання кутових швидкостей (поглинання кінетичної енергії оберальних деталей), дорівнює

$$L_c = 0,5 \cdot J_n \cdot (\omega_{i+1} - \omega_i)^2. \quad (6)$$

Виходячи з рівняння (6), можна сказати, що робота буксування синхронізатора не залежить від часу синхронізації. Питома робота тертя, за величиною якої оцінюють працездатність синхронізатора, визначається:

$$l_c = \frac{L_c}{A_a} \leq [l_c]. \quad (7)$$

### Висновки

Спираючись на проведені дослідження, можна сформулювати напрями подальших досліджень процесів, що відбуваються під час перемикання передач. Використовуючи розроблену модель, необхідно провести аналіз пристроїв, які забезпечують розгін чи пригальмовування інерційної системи проміжного вала з первинним. Такі пристрої дають змогу забезпечити ввімкнення передач без процесу синхронізації, що забезпечує вимкнення із конструкції коробки передач синхронізатора, а замінити їх на муфти миттєвого ввімкнення.

### Література

1. Ветров Ю. BMW:обрезание / Ю. Ветров // Авторевю. – 2011. – №10 – С. 32 – 33.
2. Гоголов В. Группен-тест в Мюнхене / Гоголов Л. // Коммерческие автомобили. – 2010. – №9 – С. 8 – 12.
3. Driving the Future. Driveline Technology In Modern Trucks. [Електронний ресурс]. – Friedrichshafen: ZF Friedrichshafen AG, 2011. – 31 р. – Режим доступу: [www.zf.com](http://www.zf.com).
4. Розробка адаптивних систем керування трансмісій транспортних машин. Звіт про науково-дослідну роботу (заключний). – Харків: ХНАДУ, 2009. – 209 с.

Рецензент: В.П. Волков, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 17 травня 2011 р.