

8. **Hegab A. H.** Dual-fuelling of diesel engines with natural gas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. P. 666–697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.249>.
9. **Papagiannakis R. G., Hountalas D. T.** Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas. *Energy Conversion and Management*. 2004. Vol. 45, no. 18–19. P. 2971–2988. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.01.013>.
10. **Guzzella L., Onder C. H.** *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. 2nd ed. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. 432 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10775-7>.
11. **Eriksson L., Nielsen L.** *Modeling and Control of Engines and Drivelines*. Chichester : John Wiley & Sons, 2014. 588 p. ISBN 978-1118479995.
12. **Heywood J. B.** *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 978-1260116106.
13. **Zel'dovich Ya. B.** The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *Acta Physicochimica URSS*. 1946. Vol. 21. P. 577–628.
14. **Hiroyasu H., Kadota T.** Models for combustion and formation of nitric oxide and soot in direct injection diesel engines. *SAE Paper 760129*. Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 1976.
15. **Tree D. R., Svensson K. I.** Soot processes in compression ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007. Vol. 33, no. 3. P. 272–309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.03.002>.
16. **Deb K. et al.** A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6, no. 2. P. 182–197. DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.

УДК 621.432.4:534.16

## СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ МУФТИ ІЗ ПОПЕРЕДНІМ НАТЯГОМ ДЛЯ ОБМЕЖЕННЯ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ДВОВАЛЬНИХ ДИЗЕЛІВ

**Шатохін Володимир Михайлович**, докт. техн. наук, професор кафедри теоретичної і будівельної механіки, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,

e-mail: [shatokhinvlm@gmail.com](mailto:shatokhinvlm@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0002-0766-4104](https://orcid.org/0000-0002-0766-4104)

**Красніков Сергій Васильович**, канд. техн. наук, доцент кафедри ДМтаТММ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: [ysevavr@ukr.net](mailto:ysevavr@ukr.net), ORCID: [0000-0003-1441-9921](https://orcid.org/0000-0003-1441-9921)

1. Збільшення потужності та швидкості сучасних установок з ДВЗ неминує веде до зростання динамічних навантажень у них. Ефективним засобом боротьби з небезпечними крутильними коливаннями є введення пружних муфт і демпфуючих пристроїв, характеристики яких найчастіше є нелінійними. Можливості існуючих підходів на вибір їх параметрів обмежені

недосконалістю моделей самих пристроїв, специфікою моделей машинних агрегатів з ДВЗ як багатомасових систем з кількома нелінійностями. Використовувані методи аналізу нелінійних коливань не враховують особливостей зазначених моделей, що ускладнює розв'язання задач синтезу та оптимізації.

2. У доповіді запропоновано вільний від зазначених недоліків метод синтезу параметрів пружної муфти з попереднім натягом як засобу обмеження надмірних коливань у нелінійних моделях машинних агрегатів із двовальними дизелями. У його основі лежить ефективний алгоритм розв'язання задач аналізу, що використовує гармонічну лінеаризацію для інтегральних рівнянь руху, записаних за допомогою імпульсно-частотних характеристик (ІЧХ) [1]. Головна перевага такого підходу для розв'язання задач синтезу та оптимізації в тому, що кількість рівнянь руху дорівнює числу нелінійностей та трудомісткість розв'язання задачі аналізу практично не залежить від числа степенів вільності моделі. Розроблений метод використано для вибору оптимальних параметрів муфти дизеля ЗТД з метою зниження небезпечних динамічних навантажень у його силовому ланцюзі. Наведено результати експериментальних досліджень.

3. У більшості випадків моделі силових передач транспортних машин з ДВЗ мають значну кількість степенів вільності, декілька нелінійних елементів, знаходяться під періодичним впливом складного негармонічного характеру. Застосування ІЧХ лінеаризованих моделей дозволяє записати рівняння руху зазначених систем у формі інтегральних рівнянь типу Гаммерштейна, відносно кутів закручування нелінійних з'єднань [1]

$$\mathbf{y}(t) = \int_0^T \mathbf{\Phi}(t - \tau) \mathbf{f}(\mathbf{y}) d\tau + \mathbf{g}(t), \quad (1)$$

де  $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_s(t)]^T$  – вектор кутів закручування нелінійних з'єднань;  $\mathbf{f}(\mathbf{y}) = [f_1(y_1), f_2(y_2), \dots, f_s(y_s)]^T$  – нелінійна вектор-функція;  $\mathbf{\Phi}(t - \tau)$  – матриця ІЧХ лінеаризованої моделі;  $\mathbf{g}(t) = [g_1(t), g_2(t), \dots, g_s(t)]^T$  – вектор-функція реакцій лінеаризованих нелінійних з'єднань на зовнішнє збудження

$$g_j(t) = \sum_{i=1}^k \int_0^T \psi_{j,i}(t - \tau) M_i(\tau) d\tau; \quad (2)$$

$M_i(\tau)$  ( $i = \overline{1, k}$ ) – збурюючі моменти;  $\psi_{j,i}(t - \tau)$  ( $i = \overline{1, k}; j = \overline{1, s}$ ) – ІЧХ від  $i$ -ї маси до  $j$ -го лінеаризованого з'єднання;  $k$  – число збурюючих моментів;  $T$  – період коливань.

4. У динаміці машин широко розповсюджений метод гармонічної лінеаризації, що дозволяє визначати розв'язки з прийнятною для практики

точністю у разі моногармонічного збудження, якщо тільки система має резонансні або фільтруючі властивості. Використання рівнянь руху в інтегральній формі, записаних за допомогою ІЧХ, дозволяє набути економічної форми методу гармонічної лінеаризації. Як і при традиційному підході, розв'язки нелінійних інтегральних рівнянь при моногармонічному збудженні розшуковуються у вигляді

$$y_j(t) = A_j^0 + A_j^c \cos \omega t + A_j^s \sin \omega t \quad (j = \overline{1, s}), \quad (3)$$

де  $A_j^0$  – середня деформація;  $A_j^c$ ,  $A_j^s$  – відповідно косинусна і синусна амплітуди основної гармоніки деформації  $j$ -го нелінійного з'єднання.

Побудовано алгоритм знаходження  $A_j^0$ ,  $A_j^c$ ,  $A_j^s$ . Принциповим є те, що при кожному обчисленні, так званої функції нев'язки [1], необхідно розв'язувати систему лінійних алгебраїчних рівнянь порядку  $2s$ . При традиційному підході це необхідно робити для системи порядку  $2n$ , де  $n$  – число узагальнених координат.

5. Конструкція використовуваної в двигунах 5ТДФ, 6ТД, 3ТД муфти з попереднім натягом в передачі між колінчастими валами така, що при підходящому виборі параметрів її можна використовувати як демпфер коливань [2]. Для цього необхідно, щоб точка зриву коливань зі збільшенням обертів лежала правіше точки зриву при зниженні обертів. Пружна характеристика такої муфти з урахуванням зазору, обумовленого технологічними зазорами в зубцях шестерень головної передачі, показана на схемі механічної моделі двигуна 3ТД (рис. 1).

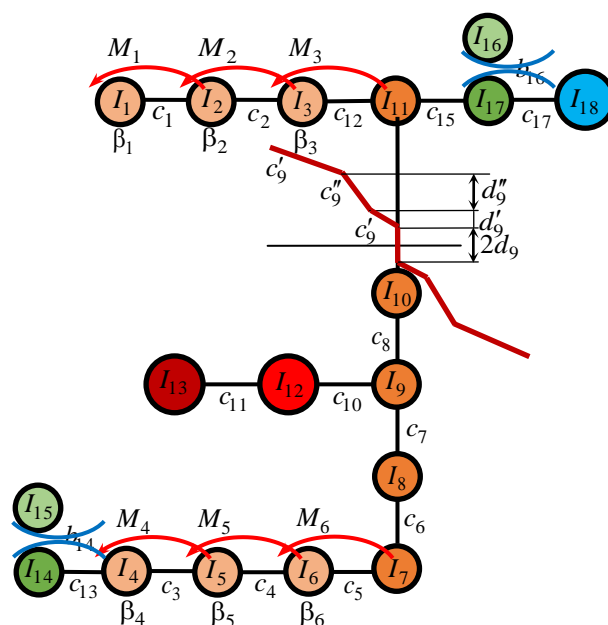


Рисунок 1 – Механічна модель машинного агрегату із дизелем 3ТД

З графіків рис. 2, а видно як реалізуються обмеження амплітуд коливань при зростанні та зниженні обертів. Тут  $\omega^*$  і  $\omega^{**}$  – частоти, при яких відбуваються стрибки відповідно з першої стійкої ділянки на другу (збільшення обертів) і з другої на третю (зменшення обертів). Представлено граничний випадок, коли  $\omega^{**} = \omega^*$ ; штриховими лініями показані нестійкі гілки розв'язків.

На рис. 1. прийнято такі позначення:  $I_1 \div I_3$ ,  $I_4 \div I_6$  – відповідно циліндрові маси випускного і впускного валів;  $I_7 \div I_{11}$  – шестерні головної передачі;  $I_{12}$  – компресор;  $I_{13}$  – турбіна;  $I_{14}$  – ступиця демпфера впускного валу;  $I_{15}$ ,  $I_{16}$  – маховики демпферів;  $I_{17}$  – маховик двигуна у зборі зі зчепленням та жорстко пов'язана з ним ступиця демпфера випускного валу;  $I_{18}$  – гідрогальмо.

б. Сформульовано задачу динамічного синтезу параметрів муфти як задачу нелінійного програмування: варіюючи вектор її параметрів  $x = [x_1, x_2, \dots, x_l]^T$  (елементами вектора можуть бути і параметри моделі) необхідно домогтися того, щоб максимальна амплітуда пружного моменту в нелінійній муфті на частоті  $\omega^{**}$  стала мінімальною

$$\min_{x \in X} A_M^{(3)}(\mathbf{x}, \omega^{**}), \quad (4)$$

де  $X$  – область пошуку допустимих розв'язків, що задається у вигляді лінійних та нелінійних обмежень відносно параметрів, що варіюються.

7. Застосування демпферів дозволяє зменшити небезпечні динамічні навантаження рис. 2, б. Суттєвого ж зниження небезпечних коливань можна, проте, домогтися дешевшими і найпростішими конструкторськими заходами, якщо скористатися викладеним вище методом синтезу параметрів муфти.

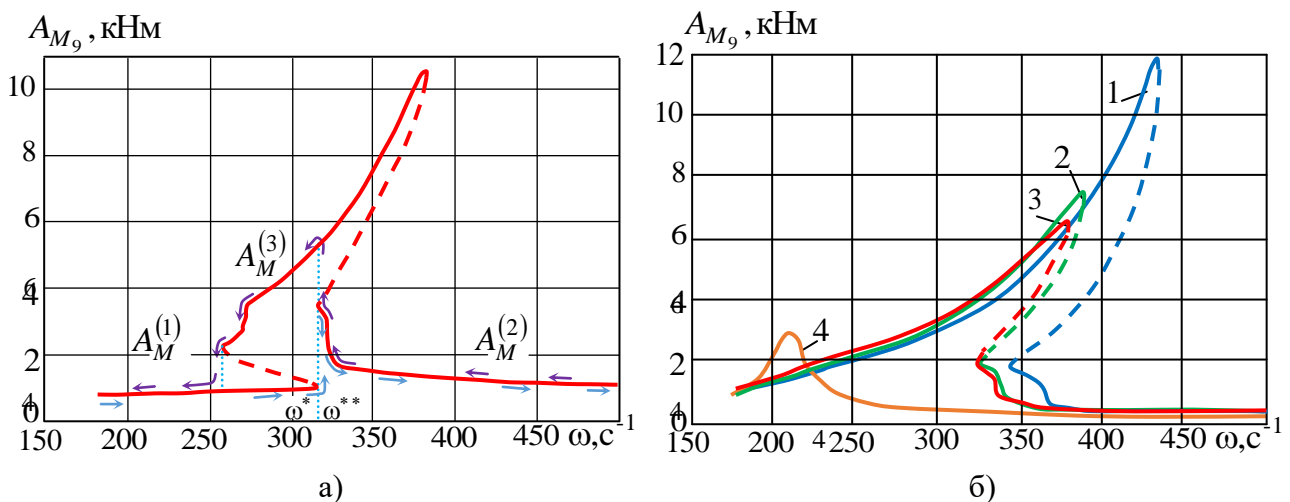


Рисунок 2 - Пружні моменти у нелінійній муфті: а) – при зростанні та зниженні обертів; б) – при відсутності демпферів 1; демпфер на впускному валу 2; два демпфера на впускному та випускному валах 3; лінійна модель без демпферів 4

На рис. 2, а представлені відповідні криві, що ілюструють зміну пружного моменту в муфті. Тепер і при збільшенні та при зниженні оборотів має місце обмеження амплітуд коливань. Без використання демпферів максимальний момент в цьому випадку вдається знизити до 5500 Нм, що підтверджує ефективність викладеного конструктивного прийому для зниження рівня небезпечних динамічних процесів.

### Висновки

1. Запропоновано метод синтезу параметрів муфти із попереднім натягом як засобу обмеження крутильних коливань двовальних дизелів.
2. Задача динамічного синтезу зведено до розв'язання задачі нелінійного програмування.
3. Розроблено метод гармонічної лінеаризації для рівнянь руху нелінійних моделей машинних агрегатів з ДВЗ, записаних в інтегральній формі, який особливо ефективний при розв'язанні задач аналізу ітераційними способами а також синтезу та оптимізації.
4. Побудовано достовірну нелінійну динамічну модель машинного агрегату з дизелем ЗТД та здійснено оптимальний синтез її параметрів з метою зниження динамічних навантажень.
5. Наведено результати експериментальних досліджень та їх зіставлення з даними розрахунків.

### Література

1. **Шатохін В. М.** Аналіз та параметричний синтез нелінійних силових передач машин : монографія. Харків : НТУ «ХПІ», 2008. 456 с.
2. **Шатохін В. М., Гранько Б. Ф., Соболев В. М.** Про вибір параметрів нелінійної пружної муфти як гасителя коливань у двовальних транспортних дизелях. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2021. Вип. 93. С. 118–127.