

В.С. Тіщенко, О.А. Логвіненко

Український державний університет залізничного транспорту, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ НАБІГАННЯ КРУТНИХ МОМЕНТІВ В ПІДСИСТЕМІ РОЗПОДІЛЬНОГО ВАЛУ БАГАТОЦИЛІНДРОВОГО ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ

*Стаття присвячена висвітленню особливостей моделювання набігання крутних моментів в підсистемі розподільного валу дизеля. Представлено підхід до моделювання формування крутних моментів в перерізах розподільного валу з урахуванням особливостей конструкції механічної системи дизеля. Описання напруженого стану елементів конструкції необхідно для моделювання деформованого стану розподільного валу. Наведені рекомендації щодо подальшого використання отриманих результатів.*

**Ключові слова:** тепловоз, механічна система, розподільний вал, напружений стан.

### Постановка проблеми

Залізничний транспорт є важливою складовою транспортної мережі України. Це обумовлено в необхідності обслуговування великих потреб у залізничних перевезеннях та якістю надання послуг як у вантажному так і у пасажирському русі. Дотримання належного рівня якості обслуговування, який безпосередньо залежить від стану існуючого тягового рухомого складу, можливо лише за умов підтримки належного рівня надійності та працездатності локомотивного парку Укрзалізниці. Значна частка вантажного і пасажирського рухомого складу, що експлуатуються на неелектрифікованих залізничних мережах України (2ТЕ116, ТЕП70), обладнана V-подібною енергетичною установкою, тому особливого значення набуває проблема їх експлуатаційної надійності та довговічності [1]. З урахуванням цього виникає необхідність проведення розрахунково-експериментальних досліджень напружено-деформованого стану відповідальних деталей та агрегатів дизеля, серед яких особливе місце посідає розподільний вал (РВ). Такі дослідження, в свою чергу, потребують проведення в якості одного з етапів заходи, спрямовані на розробку відповідної математичної моделі, яка враховує особливості формування крутних моментів, що набігають, в підсистемі РВ. Тому дослідження, спрямовані на розробку математичної моделі, яка враховує особливості конструкції механічної системи багатоциліндрового тепловозного дизеля і дозволяє отримати результати моделювання напруженого стану РВ близького до експлуатаційних показників, слід вважати актуальними [2].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз літературних джерел [3 – 5] показав, що на теперішній час проводяться чисельні теоретичні вишукування щодо напружено-деформованого стану елементів конструкції механічних систем технічних засобів, які здебільшого спрямовані на теоретичні дослідження явища формування напружень під дією зовнішніх навантажень. В той же час питання, пов'язані з практичним виявленням та описанням особливостей формування навантажень на елементи механічної системи з урахуванням особливостей конструкції сучасного рухомого складу не знайшли достатнього висвітлення. Це ускладнює вирішення актуальної задачі з підвищення надійності та довговічності механічної системи сучасного тягового рухомого складу в цілому.

**Метою** статті є висвітлення розробленого підходу моделювання навантаженого стану розподільного валу з використанням розробленої математичної моделі, що враховує особливості конструкції механічної системи тягового рухомого складу.

### Виклад основного матеріалу

Серед ряду етапів досліджень навантаженого стану елементів механічної системи багатоциліндрового тепловозного дизеля першочерговим є описання особливостей взаємодії між підсистемами локомотивної енергетичної установки. З метою дослідження такої взаємодії на попередньому етапі була розроблена структурно-функціональна схема механічної системи локомотивної енергетичної установки (рис.1) [6]. При розробці схеми виділено наступні підсистеми:

- ПРВ – підсистема розподільного валу (включає ряд секцій СРВ);
- ПЦМ – підсистема циліндрових модулів;
- ПКВ – підсистема колінчатого валу;

- ППМ – підсистема передаточного механізму;
- ПДО – підсистема допоміжного обладнання.

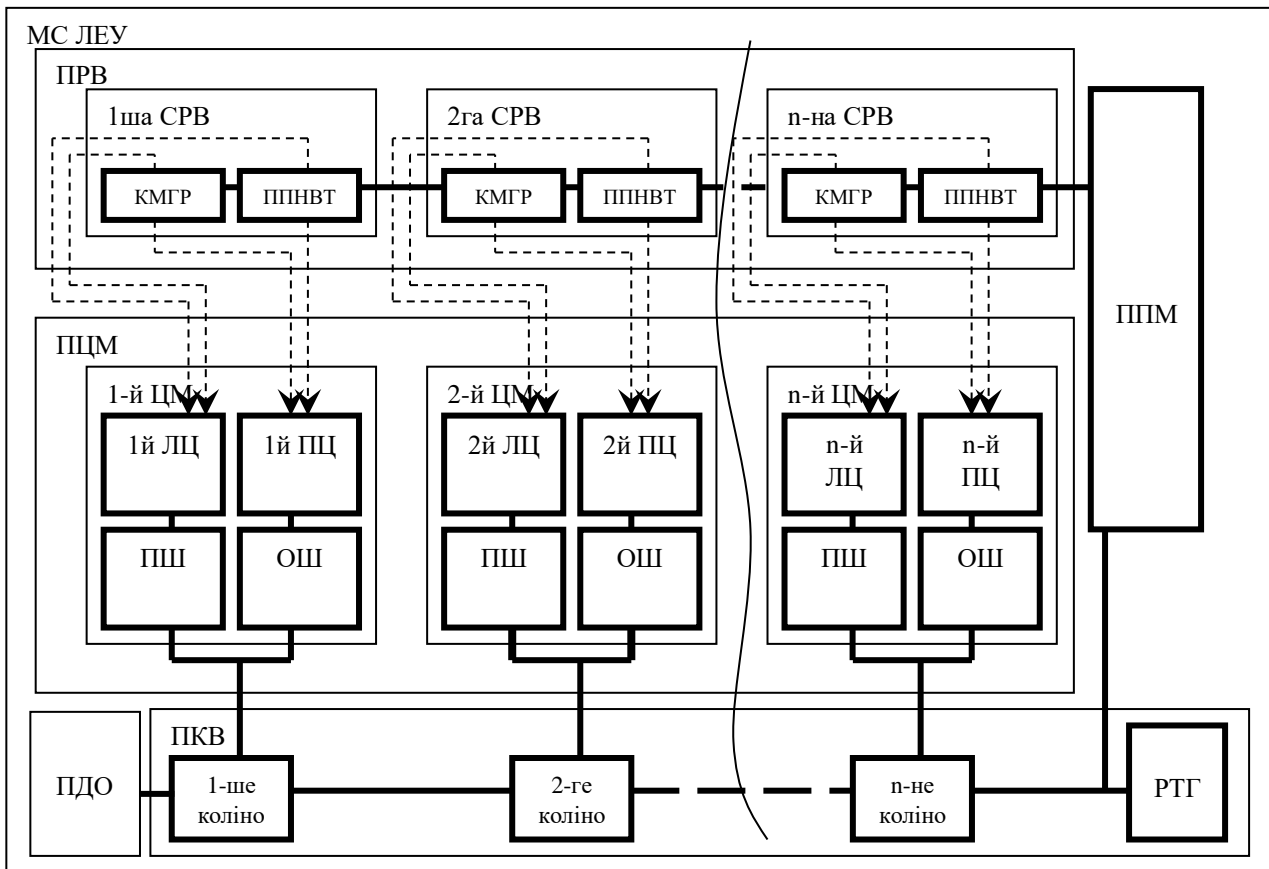


Рис. 1. Структурно-функціональна схема механічної системи локомотивної енергетичної установки.

Видно, що навантаження в підсистемі розподільного валу формуються від дії вхідного крутного моменту ППМ та набігання крутних моментів ряду СРВ, які в свою чергу включають навантаження в перерізах кулачкових механізмів газорозподілу (КМГР) та приводу паливних насосів високого тиску (ППНВТ). При цьому слід зауважити, що особливості конструкції V-подібних дизелів передбачають формування навантажень в перерізах СРВ від дії циліндрів з основним (ОШ) та при причіпним (ПШ) шатунами у відповідності до порядку їх роботи. Наприклад 16-циліндрова енергетична установка 2В9ДГ 16ЧН26/26 має порядок роботи циліндрів 1пр-4л-5пр-2л-7пр-6л-3пр-1л-8пр-5л-4пр-7л-2пр-3л-6пр-8л, 20-циліндрова - 1л-10пр-7л-4пр-2л-9пр-6л-5пр-3л-8пр-10л-1пр-4л-7пр-9л-2пр-5л-6пр-8л-3пр.

Це визначило напрямок подальших досліджень, що полягає у визначенні навантаження, що діє в перерізах окремих КМГР та ППН з подальшим їх зміщенням у відповідності до

порядку роботи. Так на рис. 2 – 5 наведено результати моделювання формування крутних моментів в перерізах впускних та випускних (КМГР), паливних (ППНВТ) кулачків, а також в перерізі привідної шестерні розподільного валу (вхідний крутний момент від дії ППМ). Слід зазначити, що значення крутного моменту, що діє в перерізі кулачків отримані з узагальненої формули:

$$T_{кр} = (F + F_{np} + F_i) \cdot \sin \gamma, \quad (1)$$

де  $F$  – сила, що визначається законом зміни тиску в над плунжерному просторі для паливного кулачка, або приведені до ролика сили від дії циліндрів для впускного та випускного кулачків;

$F_{np}$  – сила пружин;

$F_i$  – сила інерції плунжера або механізму привода клапанів;

$\gamma$  – кут тиску.

$$\gamma = \arctg\left(\frac{V_q}{R_{ноч} + S + R_\rho}\right), \quad (2)$$

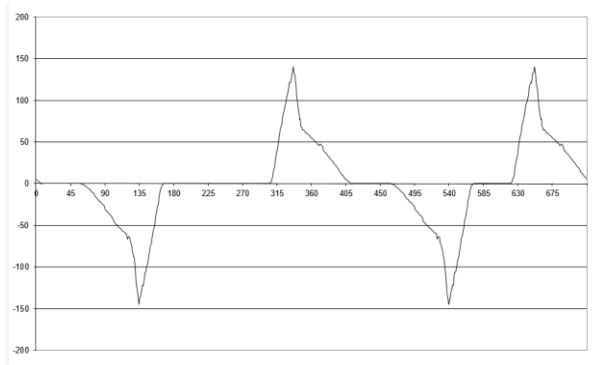


Рис. 2. Формування крутного моменту в перерізі випускного кулачка в залежності від кута повороту колінчатого валу

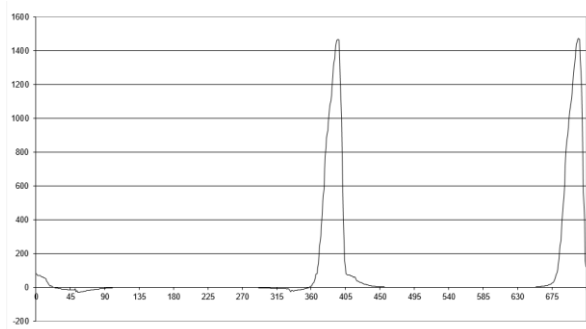


Рис. 3. Формування крутного моменту в перерізі паливного кулачка в залежності від кута повороту колінчатого валу

На основі використання узагальнених формул [7,8] отримані масиви крутних моментів в перерізах кулачків КМГР та ППНВТ. Шляхом виконання транспозицій і лінійних операцій над матрицями, можливо отримати блочну матрицю [9, 10] навантаження розподільчого валу, яка включає вектор-стовпець навантаження, що формується в перерізі привідної шестерні. При цьому враховано особливості конструкції модуля газорозподілу, серед яких можна виділити те що кожен кулачок сприймає навантаження від механізмів одного циліндрового модуля.

Розроблена математична модель та проведені розрахункові дослідження з використанням цієї моделі та запропонованого підходу, що базується на визначенні крутних моментів в перерізах КМГР та ППНВТ за допомогою узагальнених формул та матричних методів дозволили описати навантажений стан розподільного валу

де  $V_q$  – аналог швидкості плунжера або штовхача;

$R_{ноч}$  – радіус початкового кола кулачка;

$S$  – переміщення плунжера або штовхача;

$R_\rho$  – радіус ролика.

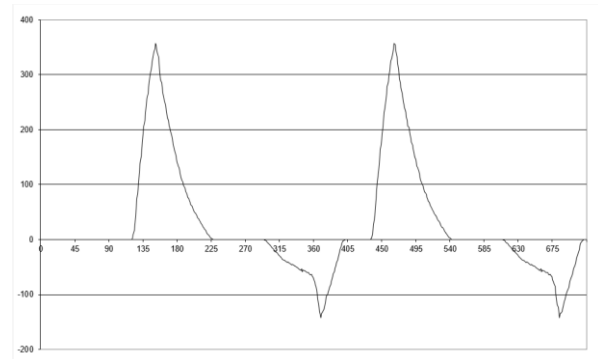


Рис. 4. Формування крутного моменту в перерізі випускного кулачка в залежності від кута повороту колінчатого валу

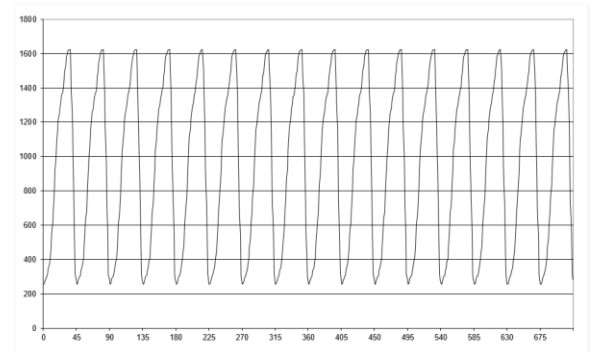


Рис. 5. Формування крутного моменту в перерізі привідної шестерні в залежності від кута повороту колінчатого валу

багатоциліндрового тепловозного дизеля. Моделювання показало, що формування на шарування крутних моментів по циліндрових модулях відбувається у відповідності до особливостей конструкції механічної системи локомотивних енергетичних установок. Слід зазначити, що таке нерівномірне розподілення крутних моментів по перерізах розподільного валу повинне бути враховане в подальших розрахункових дослідженнях напружено – деформованого стану елементів конструкції механічної системи багатоциліндрових локомотивних дизелів.

### Висновки та пропозиції подальших досліджень

Розглянуті в статті особливості моделювання набігання крутних моментів в підсистемі розподільного валу багатоциліндрового

тепловозного дизеля, запропонована математична модель та рекомендації з її використання дозволяють проводити моделювання формування навантажень в перерізах РВ, що виникають в механічних системах енергетичних установках локомотивів. Отримані результати можуть бути використані для дослідження близького до експлуатаційного напружено – деформованого стану РВ, що має важливе значення для оцінки експлуатаційної надійності та довговічності багаточиліндрових тепловозних дизелів.

### Література

- 1 Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Міністерство інфраструктури. Схвалена розпорядженням Кабінету міністрів України №430-з від 30 травня 2018 р.
- 2 Тищенко В.С. Моделювання експлуатаційних навантажень і деформацій в механічній системі локомотивних енергетичних установок з використанням комплексного математичного забезпечення. // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 32. – С. 151 – 154.
- 3 Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Яцун В.В., Скрнік І.О., Гупка А.Б. Напружено-деформований стан поверхневого шару деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення. // Центральноросійський науковий вісник. Технічні науки. – Кропивницький: ЦНТУ, 2019 – Вип. 1 (32). – С. 103 – 113.
- 4 Ступницький В.В. Дослідження напружено-деформованого стану деталей машин під час їх механічного оброблення у зоні стружкоутворення. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2012. - №730 : Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – С. 125-129.
- 5 Василюшин, В. Я. Вплив крутного моменту згинання на опір втомлюваності замкових різьбових з'єднань бурових труб / В. Я. Василюшин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2010. - № 4. - С. 55-58.
- 6 Тищенко В.С. Новий підхід до розрахункових досліджень механізмів локомотивної енергетичної установки з v-подібним дизелем. // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 117. – С. 159 – 163.
- 7 Механіка матеріалів і конструкцій. Частина 1. Просте навантаження [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка / А. Є. Бабенко, О. О. Боронко, С. М. Шукаєв, А. П. Грабовський, О. П. Заховайко, Є. Є. Онищенко, С. І. Трубочев, В. А. Колодежний, Я. І. Лавренко, А. М. Бабак ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 7.43 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 203 с.
- 8 Панін К.В. Кручення зі згином та розтягом пружно-пластичного стержня. // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій, (30), С. – 155-163. <https://doi.org/10.15421/4219035>
- 9 Навчальний посібник з лінійної алгебри для студентів механіко-математичного факультету / О. О. Безуцук, О. Г. Ганюшкін, Є. А. Кочубінська. – К. : ВПЦ "Київський університет", 2019. – 224 с.
- 10 Лінійна алгебра та аналітична геометрія: Навч. посібник / В. В. Булдігін, І. В. Алексєєва, В. О. Гайдеї, О. О. Диховичний, Н. Р. Коновалова, Л. Б. Федорова; за ред. проф. В. В. Булдігіна. — К.: ТВіМС, 2011. — 224 с.

### References

- 1 National transport strategy of Ukraine for the period up to 2030. Ministry of Infrastructure. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 430-z of May 30, 2018.
- 2 V.S. Tishchenko Modeling of operational loads and deformations in the mechanical system of locomotive power plants using complex mathematical support. // Coll. of science works – Donetsk: DonIZT, 2012. – Issue 32. – P. 151 – 154.
- 3 Aulin V.V., Lysenko S.V., Hrynkiv A.V., Yatsun V.V., Skrnnik I.O., Gupka A.B. The stressed-deformed state of the surface layer of parts during the implementation of tribotechnologies of running-in and recovery. // Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences. – Kropyvnytskyi: National Technical University, 2019 – Issue 1 (32). - P. 103 - 113.
- 4 Stupnytskyi V.V. Study of the stress-strain state of machine parts during their machining in the chip formation zone. // Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. – 2012. - No. 730: Dynamics, strength and design of machines and devices. - P. 125-129.
- 5 Vasylyshyn, V. Ya. Influence of screwing torque on the fatigue resistance of lock threaded drill pipe joints / V. Ya. Vasylyshyn // Exploration and development of oil and gas fields. - 2010. - No. 4. - P. 55-58.
- 6 V.S. Tishchenko A new approach to computational studies of the mechanisms of a locomotive power plant with a v-shaped diesel engine. // Coll. of science works – Kharkiv: UkrDAZT, 2010. – Issue 117. – P. 159 – 163.
- 7 Mechanics of materials and structures. Part 1. Simple load [Electronic resource]: study guide for students of specialty 131 Applied mechanics / A. E. Babenko, O. O. Boronko, S. M. Shukaev, A. P. Grabovskiy, O. P. Zakhovayko, E. E. Onishchenko, S. I. Trubachev, V. A. Kolodezhny, Y. I. Lavrenko, A. M. Babak; KPI named after Igor Sikorsky. – Electronic text data (1 file: 7.43 MB). – Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2023. – 203 p.
- 8 Panin K.V. Torsion with bending and stretching of elastic-plastic rod. // Problems of computational mechanics and structural strength, (30), pp. 155-163. <https://doi.org/10.15421/4219035>
- 9 Study guide on linear algebra for students of the Faculty of Mechanics and Mathematics / O. O. Bezusach, O. G. Ganyushkin, E. A. Kochubinska. – K.: VOC "Kyiv University", 2019. – 224 p.
- 10 Linear algebra and analytic geometry: Teaching manual / V. V. Buldygin, I. V. Alekseeva, V. O. Gaidei, O. O. Dykhovychny, N. R. Konovalova, L. B. Fedorova; under the editorship Prof. V. V. Buldighina. — K.: TViMS, 2011. — 224 p.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.В. Фомін, Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, Україна.

**Автор:** ТИЩЕНКО Вадим Сергійович кандидат технічних наук, доцент кафедри «Механіка і проектування машин» Український державний університет залізничного транспорту  
E-mail - [tishchenkomppm@gmail.com](mailto:tishchenkomppm@gmail.com)

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2401-1746>

**Автор:** ЛОГВІНЕНКО Олександр Анатолійович кандидат технічних наук, доцент кафедри «Механіка і проектування машин» Український державний університет залізничного транспорту  
E-mail - [logvinenko.mpm@gmail.com](mailto:logvinenko.mpm@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5731-7995>

## DETERMINATION OF THE FREQUENCY OF NATURAL OSCILLATIONS OF THE ELEMENTS OF THE MECHANICAL SYSTEM OF THE MOTOR CARRIAGE ROLLING STOCK

V. Tishchenko, O. Lohvinenko

Ukrainian state university of railway transport, Ukraine

*Of particular importance is the problem of operational reliability and durability of locomotive power units (diesel engines), which equip a significant portion of freight and passenger rolling stock operating on non-electrified railway networks in Ukraine. This necessitates conducting computational and experimental studies of the stress-strain state of critical diesel engine parts and assemblies, among which the camshaft holds a special place. At the same time, such studies require, as one of the stages, measures aimed at developing an appropriate mathematical model that considers the peculiarities of formation of accumulating torque moments in the camshaft subsystem. Therefore, research aimed at developing a mathematical model that considers the design features of the mechanical system of a multi-cylinder locomotive diesel engine and allows obtaining simulation results of the camshaft stress state close to operational indicators should be considered relevant.*

*The article highlights an approach to modeling torque accumulation in the diesel engine camshaft subsystem using a mathematical model developed by the authors, which takes into account the design features of the mechanical system of modern traction rolling stock. A structural-functional scheme of the locomotive power unit (LPU) mechanical system is presented, which was developed to study the interaction between its subsystems, the description of which is paramount among the series of stages in studying the loaded state of the LPU mechanical system elements. This scheme contains several subsystems, namely: the camshaft subsystem; cylinder modules; crankshaft; transmission mechanism; and auxiliary equipment. Its analysis allowed noting that loads in the camshaft subsystem are formed from the action of input torque and accumulation of series torque moments, which in turn include loads in the sections of valve gear cam mechanisms and high-pressure fuel pump drives.*

*The presented results show the modeling of torque formation in the sections of intake and exhaust valves of the valve gear mechanism, fuel cams, and in the section of the camshaft drive gear. Generalized formulas are provided, which allowed obtaining arrays of torque moments in the sections of valve gear cam mechanisms and high-pressure fuel pump drives. It is noted that the formation of torque layering across cylinder modules occurs in accordance with the design features of the LPU mechanical system. Recommendations for further use of the obtained results are provided.*

**Key words:** locomotive, mechanical system, camshaft, stressed state.