

В. Б. Кононов, О. А. Кононова, Ю. Д. Мусаїрова

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АНАЛОГІЙ ПРИ ПОБУДОВІ ТА РОЗРАХУНКУ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ВАЛОПРОВОДУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Анотація. Мета статті – обґрунтування можливості використання електромеханічних аналогій при побудові та розрахунку параметрів імітаційної моделі процесу крутильних коливань валопроводу двигуна внутрішнього згоряння, яка дозволить переходити від механічних моделей валопроводів до їх електричних аналогів. **Результати дослідження.** В статті з'ясовується зв'язок між явищами, що відбуваються в механічних та електричних системах, встановлюються механічні та електричні аналоги, а саме зусилля розглядається як електрорушійна сила або напруга, швидкість як струм, момент інерції як індуктивність, податливість пружини як ємність, коефіцієнт тертя як електричний опір, а кінематична схема валопроводу представляється в вигляді схеми реактивного двополосника, параметри якого визначаються в ході аналітичних розрахунків кінематичної схеми пружної системи. Введено поняття динамічної жорсткості яке аналогічно поняттю реактивного опору двополосника. Наводяться вихідні дані для розрахунку лінійної системи, в якому прийнято, що податливість амортизатора дорівнює нулю. **Висновки.** За результатами проведених аналогій були отримані параметри імітаційної моделі. Проведений розрахунок пружної системи з використанням методу електромеханічних аналогій дозволив побудувати імітаційну модель валопроводу двигуна внутрішнього згоряння.

Ключові слова: модель; електромеханічні аналогії; крутильні коливання; реактивний двополосник.

Вступ

Постановка проблеми. Явища, що мають місце в реальних процесах, які відбуваються в різноманітних пристроях і їх елементах, як правило, досліджуються з використанням законів фізики. При цьому під час проведення досліджень використовуються відповідні системи рівнянь, які при вивченні перехідних процесів описуються диференціальними рівняннями. Виходячи з єдності рівнянь, які відповідають деяким двом явищам, що відбуваються в різних середовищах, наприклад, в електричному колі і в механічній системі, можливо встановити аналогію між цими явищами і суттєво спростити дослідження механічної системи, замінюючи цю систему електричним колом. Слід підкреслити, що виконання електричного кола більш компактне, вимірювання в цьому колі більш точні та прості. Тому з'ясуємо, як можливо використати основні положення електромеханічної аналогії для побудови імітаційної моделі процесу крутильних коливань двигуна внутрішнього згоряння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1-7, 10-13] наводяться теоретичні і практичні результати, які отримані іншими авторами за даним напрямом. Разом з тим, в даних роботах не обґрунтована можливість використання електромеханічних аналогій для дослідження процесу крутильних коливань.

Мета статті – обґрунтування можливості використання електромеханічних аналогій при побудові та розрахунку параметрів імітаційної моделі процесу крутильних коливань валопроводу двигуна внутрішнього згоряння, яка дозволить переходити від механічних моделей валопроводів до їх електричних аналогів.

Виклад основного матеріалу

В статті обґрунтовується метод дослідження процесу крутильних коливань заснований на вико-

ристанні імітаційної моделі цього процесу. Метод заснований на використанні, при побудові моделі, явища електромеханічної аналогії. Відповідно до методу електромеханічних аналогій [8-9] задане зовнішнє зусилля розглядається як джерело сили – в електричному колі як електрорушійна сила або напруга, а швидкість, яка задана, як джерело швидкості або джерело струму чи струм.

Роль пасивних елементів в механічних колах виконують маси, моменти інерції, пружини та механічні демпфуючі опори. Оскільки момент інерції представляє собою коефіцієнт пропорційності між моментом та лінійним або кутовим прискоренням його слід в електричному колі вважати індуктивністю. Пружина виконує роль пасивного елемента, в якому накопичується потенційна енергія, електричний аналог якої є електрична енергія, а податливість пружини, обернено пропорційна її жорсткості, де ємність в електричному колі пропорційна податливості в механічному колі. Тертя, а саме коефіцієнт тертя, пропорційний активному опору в механічному колі, це електричний опір. При побудові імітаційної моделі процесу крутильних коливань, будемо шукати аналог динамічної жорсткості пружної системи валопроводу, кінематична схема якого включає ділянки валу та махові маси.

За результатами проведеної аналогії з метою підтвердження існуючої математичної моделі доцільно запропонувати імітаційну модель процесу крутильних коливань валопроводу дизель-генератора АСДГ-500ППТ у складі дизеля М-619 та генератора Р-504, оснащеного шинно-карданною муфтою. Визначимо основні характеристики агрегату:

- потужність: $N = 500$ кВт;
- кількість обертів: $n = 150$ об/хв.;
- кількість циліндрів: $z = 12$;
- кількість тактів в циліндрі: $m = 4$;
- кут розвалу між блоками: $\gamma = 60^\circ$;

В цих рівняннях: $J_i \ddot{\phi}_i$ - інерційний момент i -го диска; $C_i (\phi_i - \phi_{i+1})$ - момент пружних сил i -ої ділянки валу; ϕ_i - кут відхилення відповідного диску від нейтрального положення.

Рішення системи рівнянь (1) має такий вигляд:

$$\phi_i = \phi_{i0} \sin(pt + \gamma), \tag{2}$$

де ϕ_{i0} - амплітудне значення кута відхилення i -го диску; γ - початковий кут відхилення диску; p - частота власних коливань.

Двічі виконавши диференціювання виразу (2) та вводячи позначення відносних амплітуд $\phi_{10}/\phi_{10} = \alpha_1 = 1$; $\phi_{i0}/\phi_{10} = \alpha_i$, отримуємо після сумування всіх рівнянь (1):

$$-p^2 (J_1 \alpha_1 + J_2 \alpha_2 + \dots + J_{15} \alpha_{15}) = 0. \tag{3}$$

Оскільки $p^2 \neq 0$, то при вільних крутильних коливаннях многочлен, який записаний у дужках рівняння (3) мусить дорівнювати нулю. Саме в цьому полягає зміст розрахунку, відповідно до якого знаходять для різних значень p відносні амплітуди, наприклад

$$\alpha_2 = 1 - \frac{J_1 p^2}{C_1}; \alpha_2 = C_2 (C_1 - J_1 p^2) / (C_1 (C_2 - J_2 p^2)). \tag{4}$$

Таким чином методом послідовних наближень знаходять ті значення p , які перетворюють многочлен, який записаний в дужках співвідношення (3) в нуль. Менше значення p дає першу (одно вузлову) форму коливань. Наступне значення p визначає другу (двовузлову) форму коливань. Для дизель-генератора АСДГ-500ППТ наявність шинно-карданної муфти забезпечує обмеження амплітуд коливань, тобто робить розглядаєму пружну систему нелінійною, тому був виконаний перерахунок вільних та резонансних коливань трьохвузлової форми.

Для спрощення аналізу процесів, що мають місце при появі крутильних коливань, особливо у випадку складних схем валопроводу, замість складання систем диференціальних рівнянь (1) зручно використовувати поняття динамічної жорсткості [1-3] під яким розуміють відношення амплітуди збурюючого моменту M_A скажімо в точці A валопроводу до амплітуди коливань кута закручування ϕ_A в цій точці.

При знаходженні динамічної жорсткості системи в [1] пропонується використовувати метод Терських (метод ланцюгових дробів), відповідно до якого динамічна жорсткість валика, що не має маси дорівнює його статичній жорсткості, а динамічна жорсткість одного диска дорівнює Jp^2 .

$$C_\delta = 1 / \left(-1/Jp^2 + 1/C \right), \tag{5}$$

де p - частота коливань.

Для n -масової системи динамічна жорсткість C_δ визначається таким чином

$$\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{\dots} - J_3 p^2} + \frac{1}{C_2}} - J_2 p^2} + \frac{1}{C_1}} - J_1 p^2 = C_\delta. \tag{6}$$

При певному значенні частоти в системі p_i динамічна жорсткість системи стає такою, що дорівнює нулю, амплітуда коливань зростає до нескінченності, що має місце при співпадінні частоти сили, що збурує, з частотою власних коливань. Таке явище має місце при резонансі, а опис цього процесу в електричних колах носить подібний характер. Наведений опис ланцюгового дробу (6) подібний опису ланцюговому дробу, який властивий електричному двополюснику, схема якого наведена на рис. 2.

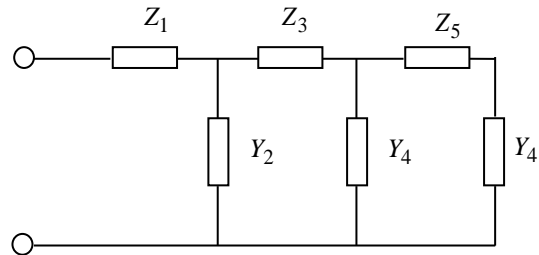


Рис. 2. Схема реактивного двополюсника (Fig. 2. Scheme of a reactive two-pole)

При визначенні реактивного опору $Z_{ex}(P)$ такого двополюсника значення $Z_{ex}(P)$ обчислюють за формулою

$$Z_{ex} = Z_1 + \frac{1}{Y_2 + \frac{1}{Z_3 + \frac{1}{Y_4 + \frac{1}{Z_5 + \frac{1}{Y_6}}}}}, \tag{7}$$

а при визначенні провідності $Y_{ex}(P)$ такого двополюсника її значення знаходять з виразу

$$Y_{ex} = \frac{1}{Z_{ex}} = \frac{1}{Z_1 + \frac{1}{Y_2 + \frac{1}{Z_3 + \frac{1}{Y_4 + \frac{1}{Z_5 + \frac{1}{Y_6}}}}}}, \tag{8}$$

де Z, Z_1, Z_3, Z_5 - реактивні опори - загальний та окремих елементів; Y_2, Y_4, Y_6 - провідності окремих елементів. Динамічна жорсткість пружної системи валопроводу, схема якого наведена на рис. 1, визначається аналогічним чином

Порівнюючи співвідношення (6), (7) та (7), (8) легко побачити, що існує певна електромеханічна аналогія, слідуючи якої динамічну жорсткість пружної системи валопроводу можливо свідомо представити її електричним аналогом, а саме реактивним опором двополосника, а пружну систему валопроводу представити електричною схемою реактивного двополосника. В схемі на рис. 2 першим елементом схеми елементом $Z_1 = pL_1$ є індуктивність, елементом $Y_2 = 1/pC_2$ є ємність. Дивлячись на співвідношення (7), можливо вважати, $J = L_m$ є ні чим іншим ніж електромеханічною індуктивністю, а вираз $1/C = C_m$ відповідає відповідно електромеханічній ємності, причому індуктивність з'єднані послідовно, а ємності паралельно. Дійсно, виходячи з елементарної схеми двополосника у якого послідовно з'єднані елементи L_1 та C_2 , маємо що $Z = p^2L_1 + 1/C_2$, що відповідає виразу для динамічної жорсткості n -масової системи,

для якої $C_0 = Jp^2 + C$. Зроблений висновок дозволяє запропонувати наступну схему імітаційної моделі пружної системи валопроводу (наведена на рис. 3). Значення індуктивностей та ємностей Y_2, Y_4, Y_6 для імітаційної моделі, схема якої наведена на рис. 3, наведені в табл. 2.

Результатом застосування імітаційної моделі є спрощення процесу аналізу процесу крутильних коливань, підвищення точності результатів оцінки технічного стану електроагрегата за рахунок врахування впливу крутильних коливань на результати визначення значень ступеня нерівномірності частоти, й спрощення прийняття відповідних конструктивних рішень, втілення яких дозволить уникнути наслідків небезпечних резонансів. Електричне імітаційне моделювання механічної системи, крім того, суттєво зменшить грошові витрати і спростить отримання бажаних результатів при налагодженні системи.

Таблиця 2 – Параметри імітаційної моделі

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8
0,12 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,031 Гн	0,012 Гн
L_9	L_{10}	L_{11}	L_{12}	L_{13}	L_{14}	L_{15}	
0,3 Гн	0,027 Гн	0,155 Гн	0,168 Гн	2,112 Гн	11,3 Гн	13,04 Гн	
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
3,3 мкФ	0,037 мкФ	0,037 мкФ	0,037 мкФ	0,037 мкФ	0,037 мкФ	0,029 мкФ	0
C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}		
0,032 мкФ	0,041 мкФ	1,16 мкФ	0,015 мкФ	0,001 мкФ	0,002 мкФ		

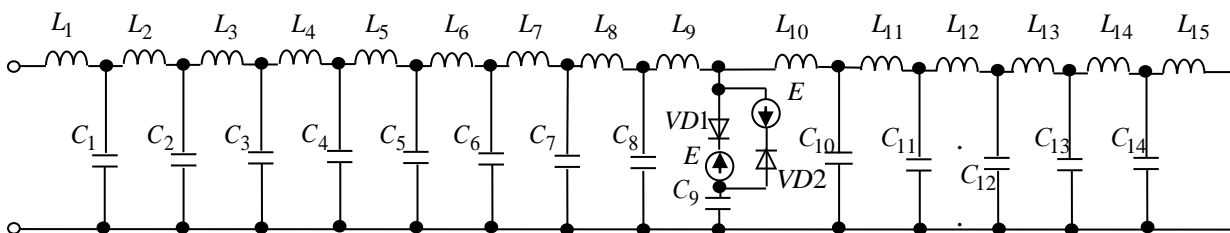


Рис. 3. Імітаційна модель валопроводу двигуна (Fig. 3. Simulation model of the motor shaft)

Висновки

1. Використання методу електромеханічних аналогій для побудови імітаційної моделі крутильних коливань двигуна внутрішнього згоряння спрощує процес аналізу процесу крутильних коливань, підвищує точність результатів оцінки технічного стану електроагрегата за рахунок врахування впливу крутильних коливань на результати визначення значень ступеня нерівномірності частоти.

2. Відповідно до методу електромеханічних аналогій кінематична схема валопроводу представляється в вигляді схеми реактивного двополосника, зусилля розглядається як електрорушійна сила або напруга, швидкість як струм, момент інерції як індуктивність, податливість пружини як ємність, коефіцієнт тертя як електричний опір.

3. Проведений розрахунок пружної системи з використанням методу електромеханічних аналогій дозволив побудувати імітаційну модель валопроводу двигуна внутрішнього згоряння.

Список літератури

1. Вихерт П. М. Конструкция и расчет автотракторных двигателей. Москва: Машиностроение, 1964. 552 с.
2. Кононов Б. Т., Бондаренко О. І. Вибір показника для оцінювання технічного стану дизель-генератора. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. № 3(52). С. 113-117.
3. Кононов Б. Т., Мусаїрова Ю. Д., Нечаус А. О. Методика врахування крутильних коливань при визначенні ступеня нерівномірності частоти обертання валу дизель-генератора. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 4 (56). С. 100-108.
4. Мусаїрова Ю. Д. Визначення амплітуд та частот крутильних коливань валопроводу дизель-генератора, в якому використовуються пристрої для гасіння коливань. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2019. № 2 (60). С. 140-152.
5. Белов П.М. Двигатели армейских машин. Часть 2. Конструкция и расчет. М.: Воениздат, 1972. 561 с.
6. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М: Ленанд, 2017. 416 с.
7. Саблиев Д. М. Диагностика неисправностей автомобиля. М.: Феникс, 2009. 256 с.

REFERENCES

1. Vihert, P. M. (1964), "Design and calculation of automotive engines", *Mechanical engineering*, Moscow, 552 p.
2. Kononov, B.T. and Bondarenko, O.I. (2017), "Choice of index for estimation of the technical state of diesel-generator", *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, Vol. 3(52), pp. 113-117.
3. Kononov, B.T., Musairova, Yu.D. and Nechaus, A.O. (2018), "Technique of accounting of torsional fluctuations when determining degree of unevenness of frequency of rotation of the shaft of the diesel generator", *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4(56), pp. 100-107.
4. Musairova, Yu.D. (2019), "Determination of the amplitudes and frequencies of the torque vibrations of the diesel-generator at a certain condition, which are using the devices of vibration movements", *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, Vol. 2(60), pp. 140-152.
5. Below, P. M. (1972), *Engines of army vehicles. Part 2. Design and calculation*, Moscow, 561 p.
6. Biderman, V.L. (2017), *Theory of mechanical vibrations*, Lenand, Moscow, 416 p.
7. Sabliyev, D.M., (2009), *Diagnostics of malfunctions of the car*, Phoenix, Moscow, 256 p.

Received (Надійшла) 28.02.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 27.04.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

- Кононов Володимир Борисович** – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Volodymyr Kononov – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: Volodymyr.Kononov@i.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9946-5056>.
- Кононова Олена Анатоліївна** – науковий співробітник, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Olena Kononova – Research Associate, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: Olena.Kononova@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6251-9495>.
- Мусаїрова Юлія Дмитрівна** – ад'юнкта, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Yulia Musairova – adjunct, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
 e-mail: musairova2015@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7188-2085>.

Использование электромеханических аналогий при построении и расчете имитационной модели процесса крутильных колебаний валопровода двигателя внутреннего сгорания

В. Б. Кононов, О. А. Кононова, Ю. Д. Мусаїрова

Аннотация. Цель статьи - обоснование возможности использования электромеханических аналогий при построении и расчете параметров имитационной модели процесса крутильных колебаний валопровода двигателя внутреннего сгорания, которая позволит переходить от механических моделей валопроводов к их электрическим аналогам. **Результаты исследования.** В статье выясняется связь между явлениями, происходящими в механических и электрических системах, устанавливаются механические и электрические аналоги, а именно усилие рассматривается как электродвижущая сила или напряжение, скорость как ток, момент инерции как индуктивность, податливость пружины как емкость, коэффициент трения как электрическое сопротивление, а кинематическая схема валопровода представляется в виде схемы реактивного двухполюсника, параметры которого определяются в ходе аналитических расчетов кинематической схемы упругой системы. Введено понятие динамической жесткости, которое аналогично понятию реактивного сопротивления двухполюсника. Приводятся исходные данные для расчета линейной системы, в котором принято, что податливость амортизатора равна нулю. **Выводы.** По результатам проведенных аналогий были получены параметры имитационной модели. Проведенный расчет упругой системы с использованием метода электромеханических аналогий позволил построить имитационную модель валопровода двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: модель; электромеханические аналогии; крутильные колебания; реактивный двухполюсник.

Use of electromechanical analogies in the construction and calculation of a simulation model of the process of torsional oscillations of the shaft line of an internal combustion engine

Volodymyr Kononov, Olena Kononova, Yulia Musairova

Abstract. The purpose of the article is to substantiate the possibility of using electromechanical analogies in the construction and calculation of parameters of the simulation model of the process of torsional oscillations of the internal combustion engine shaft, which will allow to move from mechanical models of shafts to their electrical counterparts. **Results of the research.** The article clarifies the relationship between phenomena occurring in mechanical and electrical systems, mechanical and electrical analogues are established, namely force is considered as electromotive force or voltage, velocity as current, moment of inertia as inductance, spring flexibility as capacitance, coefficient friction as electrical resistance, and the kinematic scheme of the shaft line is presented in the form of a diagram of a reactive bipolar, the parameters of which are determined during analytical calculations of the kinematic scheme of the elastic system. The concept of dynamic stiffness is introduced, which is similar to the concept of reactive resistance of a bipolar. The initial data for the calculation of a linear system in which it is assumed that the pliability of the shock absorber is zero. **Conclusions.** According to the results of the analogies, the parameters of the simulation model were obtained. The calculation of the elastic system using the method of electromechanical analogies allowed to build a simulation model of the shaft line of an internal combustion engine.

Keywords: model; electromechanical analogies; torsional oscillations; reactive bipolar.