

ЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА**Заковоротный А. Ю.**

Впервые средствами геометрической теории управления выполнен синтез линейной математической модели движения дизель-поезда в пространстве «вход-состояние», которая учитывает параллельную работу четырёх тяговых асинхронных двигателей. Полученная модель в канонической форме Бруновского позволяет исследовать и оптимизировать процессы не только разгона и движения состава с заданной скоростью, но и процессы буксования, юза, параллельной работы двигателей.

Вперше засобами геометричної теорії керування виконано синтез лінійної математичної моделі руху дизель-поїзда в просторі «вхід-стан», яка враховує паралельну роботу чотирьох тягових асинхронних двигунів. Отримана модель в канонічній формі Бруновського дозволяє досліджувати й оптимізувати процеси не тільки розгону і руху рухомого складу з заданою швидкістю, а й процеси буксування, юза, паралельної роботи двигунів.

For the first time by means of geometric control theory the synthesis of linear mathematical model of diesel-train movement in space "input-state," which allows for the parallel operation of four asynchronous traction motors is made. The resulting model in the canonical Brunovskiy form allows exploring and optimizing not only the acceleration and movement of the composition at a given speed, but also the processes of slipping, skidding, parallel operation of motors.

Заковоротный А. Ю.

канд. техн. наук, доц. каф. ВТиП НТУ «ХПИ»
arcade@i.ua

НТУ «ХПИ» – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков.

УДК 681.5

Заковоротный А. Ю.

ЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА

Вопросы исследования и оптимизации функционирования тягового подвижного состава железных дорог в течение десятилетий привлекают внимание многих специалистов [1–5]. Большинство исследований выполняется с помощью математического моделирования на сложных моделях, описываемых системами обыкновенных дифференциальных нелинейных уравнений высокого порядка. Однако поиск оптимальных решений на таких моделях затруднен. Поэтому в большинстве случаев при решении задач оптимального управления используются математические модели 2–5 порядка. При оптимизации функционирования подвижного состава с тяговым асинхронным приводом использование моделей такого низкого порядка во многих случаях невозможно в силу того, что даже упрощенная модель тягового асинхронного привода с одним эквивалентным двигателем имеет пятый порядок системы обыкновенных дифференциальных нелинейных уравнений. В то же время исследования параллельной работы двигателей, буксования, юза требует в математической модели не менее двух двигателей. Использование известных методов оптимального управления для решения задач оптимизации функционирования подобных объектов вызывает серьезные трудности [6, 7]. В связи с этим в работе [8] была предпринята попытка привлечь для решения задач оптимального управления рассматриваемыми объектами методы геометрической теории управления [9], использующие динамическую линеаризацию исходной нелинейной модели. При этом удалось получить законы оптимального управления для объектов, которые описывались системами нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений 5–6 порядка. Для поиска оптимальных законов управления реальным приводом с учетом параллельной работы электродвигателей необходимо уточнение используемых моделей (получение систем обыкновенных дифференциальных уравнений десятого и более высоких порядков) и разработка метода динамической линеаризации уточненных моделей (получение линейных моделей объекта управления в форме Бруновского), и поиск оптимальных законов управления с помощью этих моделей.

Целью работы является синтез с помощью средств геометрической теории управления линейной математической модели движения дизель-поезда в канонической форме Бруновского для последующего решения задач оптимального управления с учетом параллельной работы четырех тяговых асинхронных двигателей.

Движение дизель-поезда в режиме тяги и в режиме перехода от тяги к буксованию может быть описано следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = k_1 V; \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{q=1}^4 (k_2^q \mu^q (\Psi_{ur}^q i_{vs}^q - \Psi_{vr}^q i_{us}^q)) - k_3 - k_4 V - k_5 V^2; \quad (2)$$

$$\frac{di_{us}^q}{dt} = \alpha^q \beta^q \Psi_{ur}^q - \gamma^q i_{us}^q + \frac{k_6 p \beta^q}{r^q} V \Psi_{vr}^q + \frac{1}{\sigma^q L_s^q} u_{us}^q, \quad q = \overline{1, 4}; \quad (3)$$

$$\frac{di_{vs}^q}{dt} = \alpha^q \beta^q \Psi_{vr}^q - \gamma^q i_{vs}^q + \frac{k_6 p \beta^q}{r^q} V \Psi_{ur}^q + \frac{1}{\sigma^q L_s^q} u_{vs}^q, q = \overline{1, 4}; \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi_{ur}^q}{dt} = -\alpha^q \Psi_{ur}^q - \frac{k_6 p}{r^q} V \Psi_{vr}^q + \alpha^q L_m^q i_{us}^q, q = \overline{1, 4}; \quad (5)$$

$$\frac{d\Psi_{vr}^q}{dt} = -\alpha^q \Psi_{vr}^q - \frac{k_6 p}{r^q} V \Psi_{ur}^q + \alpha^q L_m^q i_{vs}^q, q = \overline{1, 4}, \quad (6)$$

где S – расстояние, пройденное от начала перегона; t – время; $k_1, k_2^1, k_2^2, k_2^3, k_2^4, k_3, \dots, k_6$ – постоянные коэффициенты; V – скорость движения состава; $\mu^q = \frac{p L_m^q}{J^q L_r^q}$; q – число двигателей; p – число пар полюсов статора у каждого двигателя; L_m^q ($q = \overline{1, 4}$) – индуктивность контура намагничивания (взаимная индуктивность); J^q ($q = \overline{1, 4}$) – приведенный момент инерции двигателя; L_r^q, L_s^q ($q = \overline{1, 4}$) – полные индуктивности, соответственно ротора и статора; Ψ_{ur}^q, Ψ_{vr}^q ($q = \overline{1, 4}$) – потокосцепления по осям u и v роторов тяговых двигателей; i_{vs}^q, i_{us}^q ($q = \overline{1, 4}$) – статорные токи двигателей по осям u и v ; $\alpha^q = \frac{1}{T_r^q}$; T_r^q ($q = \overline{1, 4}$) – постоянная времени ротора q -го двигателя; $\beta^q = \frac{L_m^q}{\sigma^q L_s^q L_r^q}$; $\sigma^q = 1 - \frac{(L_m^q)^2}{L_s^q L_r^q}$ ($q = \overline{1, 4}$) – полный коэффициент рассеяния q -го двигателя; $\gamma^q = \frac{R_r^q (L_m^q)^2}{\sigma^q L_s^q (L_r^q)^2} + \frac{R_s^q}{\sigma^q L_s^q}$; R_r^q, R_s^q ($q = \overline{1, 4}$) – активные сопротивления роторных и статорных обмоток двигателей; r^q ($q = \overline{1, 4}$) – радиус колеса q -го двигателя; u_{us}^q, u_{vs}^q ($q = \overline{1, 4}$) – статорные напряжения q -го двигателя по осям u и v ; $\frac{k_6 V}{r^q} = \omega^q$ ($q = \overline{1, 4}$); ω^q – частота вращения ротора q -го двигателя.

Преобразование исходной модели к линейному виду начнем с введения в правые части уравнений (3) и (4) новых управлений U_i ($i = \overline{1, 8}$), позволяющих убрать из соответствующих уравнений нелинейные части:

$$U_{2q-1} = \alpha^q \beta^q \Psi_{ur}^q + \frac{k_6 p \beta^q}{r^q} V \Psi_{vr}^q + \frac{u_{us}^q}{\sigma^q L_s^q}, U_{2q} = \alpha^q \beta^q \Psi_{vr}^q + \frac{k_6 p \beta^q}{r^q} V \Psi_{ur}^q + \frac{u_{vs}^q}{\sigma^q L_s^q}, q = \overline{1, 4}.$$

Обозначив $x_1 = S$; $x_2 = V$; $x_3 = \Psi_{ur}^1$; $x_4 = i_{us}^1$; $x_5 = \Psi_{vr}^1$; $x_6 = i_{vs}^1$; $x_7 = \Psi_{ur}^2$; $x_8 = i_{us}^2$; $x_9 = \Psi_{vr}^2$; $x_{10} = i_{vs}^2$; $x_{11} = \Psi_{ur}^3$; $x_{12} = i_{us}^3$; $x_{13} = \Psi_{vr}^3$; $x_{14} = i_{vs}^3$; $x_{15} = \Psi_{ur}^4$; $x_{16} = i_{us}^4$; $x_{17} = \Psi_{vr}^4$; $x_{18} = i_{vs}^4$; $a_{11} = k_1$; $a_{21} = a_{22} = k_2^1 \mu^1$; $a_{23} = a_{24} = k_2^2 \mu^2$; $a_{25} = a_{26} = k_2^3 \mu^3$;

$$\begin{aligned}
a_{27} = a_{28} = k_2^4 \mu^4; \quad a_{29} = k_3; \quad a_{210} = k_4; \quad a_{211} = k_5; \quad a_{31} = a_{51} = -\alpha^1; \quad a_{32} = a_{52} - \frac{k_6 p}{r^1}; \\
a_{33} = a_{53} = \alpha^1 L_m^1; \quad a_{41} = a_{61} = -\gamma^1; \quad a_{71} = a_{91} = -\alpha^2; \quad a_{72} = a_{92} = -\frac{k_6 p}{r^2}; \quad a_{73} = a_{93} = \alpha^2 L_m^2; \\
a_{81} = a_{101} = -\gamma^2; \quad a_{111} = a_{131} = -\alpha^3; \quad a_{112} = a_{132} = -\frac{k_6 p}{r^3}; \quad a_{113} = a_{133} = \alpha^3 L_m^3; \\
a_{121} = a_{141} = -\gamma^3; \quad a_{151} = a_{171} = -\alpha^4; \quad a_{152} = a_{172} = -\frac{k_6 p}{r^4}; \quad a_{153} = a_{173} = \alpha^4 L_m^4;
\end{aligned}$$

$a_{161} = a_{181} = -\gamma^4$, из системы уравнений (1) – (6) получим следующую модель, описывающую движение дизель-поезда по железнодорожному перегону:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_2 = f_1; \\
\frac{dx_2}{dt} &= \sum_{i=0}^3 a_{2(1+2i)}x_{3+4i}x_{6+4i} - \sum_{i=0}^3 a_{2(2+2i)}x_{4+4i}x_{5+4i} - a_{29} - a_{210}x_2 - a_{211}x_2^2 = f_2; \\
\frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_3 + a_{32}x_2x_5 + a_{33}x_4 = f_3; \quad \frac{dx_{2+2j}}{dt} = a_{(2+2j)1}x_{2+2j} + U_j = f_{2+2j} + U_j, \quad j = \overline{1, 8}; \\
\frac{dx_5}{dt} &= a_{51}x_5 + a_{52}x_2x_3 + a_{53}x_6 = f_5; \quad \frac{dx_7}{dt} = a_{71}x_7 + a_{72}x_2x_9 + a_{73}x_8 = f_7; \\
\frac{dx_9}{dt} &= a_{91}x_9 + a_{92}x_2x_7 + a_{93}x_{10} = f_9; \quad \frac{dx_{11}}{dt} = a_{111}x_{11} + a_{112}x_2x_{13} + a_{113}x_{12} = f_{11}; \\
\frac{dx_{13}}{dt} &= a_{131}x_{13} + a_{132}x_2x_{11} + a_{133}x_{14} = f_{13}; \quad \frac{dx_{15}}{dt} = a_{151}x_{15} + a_{152}x_2x_{17} + a_{153}x_{16} = f_{15}; \\
\frac{dx_{17}}{dt} &= a_{171}x_{17} + a_{172}x_2x_{15} + a_{173}x_{18} = f_{17}.
\end{aligned} \tag{7}$$

С системой дифференциальных уравнений (7) связаны следующие векторные поля:

$$X(x) = |f_1, f_2, \dots, f_{18}|^T,$$

$$Y_1 = |0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T, \quad Y_2 = |0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T,$$

$$Y_3 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T, \quad Y_4 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T,$$

$$Y_5 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0|^T, \quad Y_6 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0|^T,$$

$$Y_7 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0|^T, \quad Y_8 = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0|^T.$$

Система уравнений (7) может быть преобразована к форме Бруновского только в случае, если инволютивны распределения $M^0 = \text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_8\}$, $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_8, L_X Y_1, L_X Y_2, \dots, L_X Y_8\}$ и M^2 для этой системы, где $\text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_8\}$ – линейная оболочка векторов Y_1, Y_2, \dots, Y_8 , $L_X Y_k$ ($k = \overline{1, 8}$) – производные Ли вдоль векторного поля X векторных полей Y_k ($k = \overline{1, 8}$). Поскольку векторные поля Y_i ($i = \overline{1, 8}$) постоянны, то распределение M^0 – инволютивно. Проверка условий инволютивности для распределения M^1 показывает, что оно не является инволютивным, однако проверка всех его подраспределений

Поскольку вектора Y_k^* ($k = \overline{1, 8}$) постоянны, то распределение $M^{0*} = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_8^*\}$ – инволютивно. Так как производные Ли вдоль векторного поля Y векторных полей Y_k^* ($k = \overline{1, 8}$) являются постоянными векторами, то распределение M^{1*} для расширенной системы является инволютивным. Проверка инволютивности распределения $M^{2*} = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, \dots, Y_8^*, L_Y Y_1^*, \dots, L_Y Y_8^*, L_Y^2 Y_1^*, L_Y^2 Y_2^*, \dots, L_Y^2 Y_8^*\}$, где $L_Y^2 Y_k^*$ ($k = \overline{1, 8}$) – производные Ли второго порядка, показывает, что оно не является инволютивным. Однако инволютивными являются все подраспределения $M_k^{2*} = \text{span}\{Y_1, Y_2, \dots, Y_8, L_Y Y_1^*, \dots, L_Y Y_8^*, L_Y^2 Y_k^*\}$, $k = \overline{1, 8}$, распределения M^{2*} . Этого оказывается достаточно для осуществления динамической линеаризации и получения системы линейных дифференциальных уравнений в форме Бруновского. На основании теоремы о линейных эквивалентах для нелинейных аффинных систем с m управлениями [9], получим, что каноническая форма Бруновского имеет 8-м клеток, а индекс управляемости k_{\max} для данного объекта равен 8. Математическая модель объекта управления в форме Бруновского в пространстве «вход – состояние» имеет следующий вид:

$$\frac{dz_i}{dt} = z_{i+1}, \quad i = \overline{1, 26}, \quad i \neq 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26; \quad \frac{dz_{(2+3q)}}{dt} = v_q, \quad q = \overline{1, 8}, \quad (8)$$

где v_j ($j = \overline{1, 8}$) – управления.

Поскольку модель объекта в форме Бруновского имеет 8-м клеток, то необходимо определить 8-м функций $T_j(y)$ ($j = \overline{1, 8}$), преобразующих переменные расширенной модели объекта управления в переменные модели в форме Бруновского:

$$z_1 = T_1(y); \quad z_{3+k} = T_l(y), \quad l = (3+k)/3, \quad k = 3, 6, 9, \dots, 21.$$

Методика определения этих функций известна [7, 8]. В данном случае они являются однокомпонентными составляющими вектора $y = (y_1, y_2, \dots, y_{26})$. Из этих функций путем последовательного дифференцирования вдоль векторного поля $Y^* = Y + U_1 Y_1^* + U_2 Y_2^* + \dots + U_8 Y_8^*$ можно получить выражения для определения соответственно z_2, z_3, z_4, z_5 (из функции $T_1(y)$), z_7, z_8 (из функции $T_2(y)$), z_{10}, z_{11} (из функции $T_3(y)$), z_{13}, z_{14} (из функции $T_4(y)$), z_{16}, z_{17} (из функции $T_5(y)$), z_{19}, z_{20} (из функции $T_6(y)$), z_{22}, z_{23} (из функции $T_7(y)$), z_{25}, z_{26} (из функции $T_8(y)$). В качестве примера рассмотрим получение зависимостей для определения z_2, z_3, z_4, z_5 с помощью функции $T_1(y)$. Дифференцируя функцию $T_1(y)$ вдоль векторного поля Y^* и учитывая, что z_2, z_3, z_4 и их производные не зависят от управлений, получим функции перехода к канонической форме Бруновского:

$$z_2 = \frac{dz_1}{dt} = L_{Y^*} T_1(y) = L_Y T_1(y) = \sum_{i=1}^{20} \frac{\partial T_1(y)}{\partial y_i} \varphi_i = a_{11} y_2;$$

$$z_3 = \frac{dz_2}{dt} = L_{Y^*} (L_Y T_1(y)) = L_Y (a_{11} y_2) = \sum_{i=1}^{20} \frac{\partial (L_Y T_1(y))}{\partial y_i} \varphi_i = a_{11} \varphi_2 =$$

$$\begin{aligned}
& a_{11}(a_{21}y_3y_7 - a_{22}y_6y_4 + a_{23}y_9y_{13} - a_{24}y_{12}y_{10} + a_{25}y_{15}y_{19} - a_{26}y_{18}y_{16} + a_{27}y_{21}y_{25} - \\
& - a_{28}y_{24}y_{22} - a_{29} - a_{210}y_2 - a_{211}y_2^2); \\
z_4 = \frac{dz_3}{dt} &= L_{Y^*}(L_Y^2 T_1(y)) = L_Y(a_{11}\varphi_2) = \sum_{i=1}^{20} \frac{\partial(L_Y(a_{11}\varphi_2))}{\partial y_i} \varphi_i = \\
&= a_{11}[(a_{210} + 2a_{211}y_2)\varphi_2 + a_{11}a_{25}y_{19}\varphi_{15} - a_{11}a_{26}y_{16}\varphi_{18} + a_{11}a_{27}y_{25}\varphi_{21} - a_{11}a_{28}y_{22}\varphi_{24} - \\
& - a_{11}a_{21}y_7\varphi_3 + a_{11}a_{23}y_{13}\varphi_9 - a_{11}a_{22}y_4\varphi_6 - a_{11}a_{24}y_{10}\varphi_{12} - a_{11}a_{26}y_{18}\varphi_{16} + a_{11}a_{25}y_{15}\varphi_{19} - \\
& - a_{11}a_{28}y_{24}\varphi_{22} + a_{11}a_{27}y_{21}\varphi_{25} - a_{11}a_{24}y_{12}\varphi_{10} + a_{11}a_{23}y_9\varphi_{13} - a_{11}a_{22}y_6\varphi_4 + a_{11}a_{21}y_3\varphi_7]; \\
z_5 = \frac{dz_4}{dt} &= L_{Y^*}(L_Y^3 T_1(y)) = \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial(L_{Y^*}(L_Y^3 T_1(y)))}{\partial y_i} \varphi_i.
\end{aligned}$$

Аналогичным образом, задавшись значениями функций $T_2(y) = y_6 = z_6$, $T_3(y) = y_9 = z_9$, $T_4(y) = y_{12} = z_{12}$, $T_5(y) = y_{15} = z_{15}$, $T_6(y) = y_{18} = z_{18}$, $T_7(y) = y_{21} = z_{21}$, $T_8(y) = y_{24} = z_{24}$, могут быть получены соотношения для определения остальных переменных модели в форме Бруновского.

На рис. 1 и рис. 2 приведены процессы, полученные с помощью математических моделей (7) и (8). На рис. 1 с помощью переменных x_1 (модель (7)) и z_1 (модель (8)) показано изменение во времени пройденного дизель-поездом расстояния при разгоне состава до 60 км/ч на ровном участке железнодорожного пути. Как следует из рисунка $x_1 \equiv z_1$. На рис. 2 показаны изменения скорости дизель-поезда, полученные с помощью модели (7), переменная x_2 , и модели (8), переменная z_2 , как видно из рисунка $x_2 \equiv z_2$. Таким образом, математическая модель в форме Бруновского (8) эквивалентна исходной нелинейной модели объекта (7).

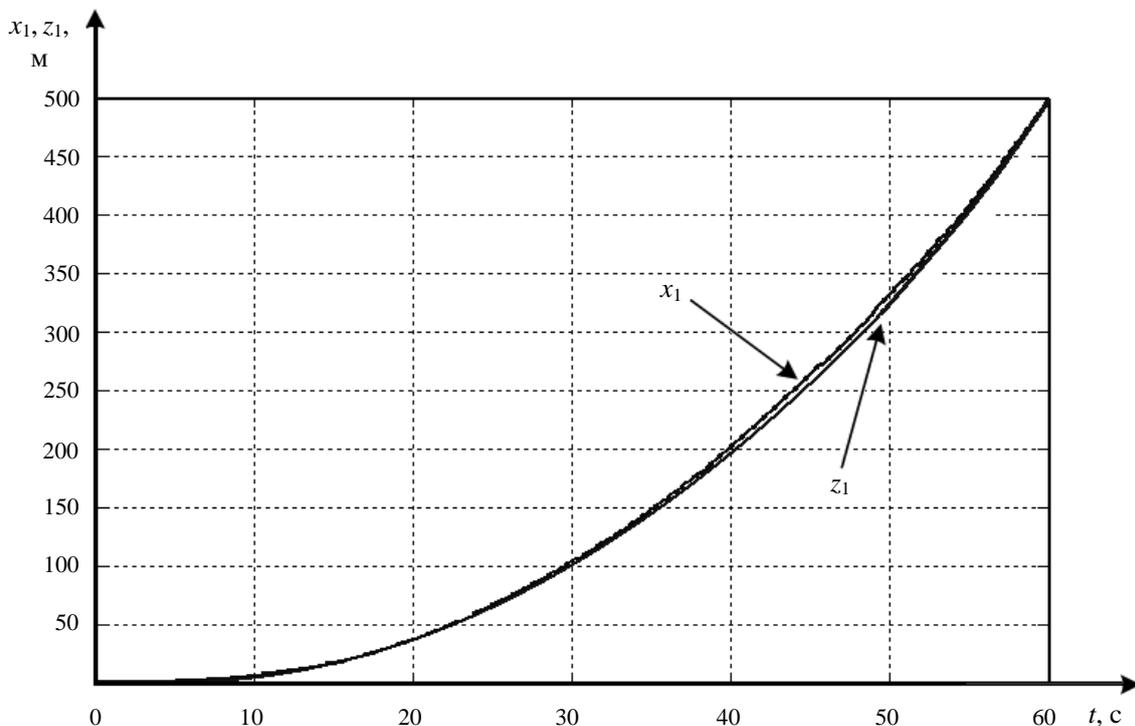
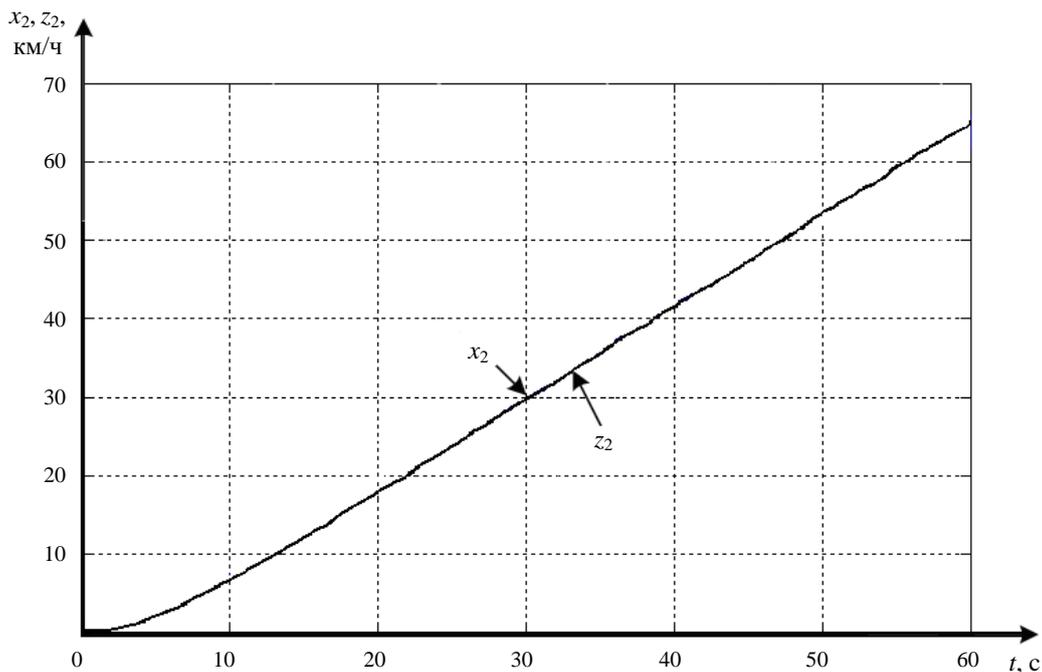


Рис. 1. Поведение переменных x_1 и z_1 во времени

Рис. 2. Поведение переменных x_2 и z_2 во времени

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые средствами геометрической теории управления получена работоспособная линейная математическая модель движения дизель-поезда в канонической форме Бруновского, которая учитывает параллельную работу четырёх тяговых асинхронных двигателей. Полученная модель может использоваться для поиска оптимальных управлений, а также для исследования процессов буксования и юза, а также параллельной работы двигателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ohishi K. Adhesion control of electric motor coach based on force control using disturbance observer / K. Ohishi, Y. Ogawa // *IEEE, Advanced Motion Control*. – April, 2000. – P. 323 – 328.
2. Тяговые и токовые характеристики электроподвижного состава с асинхронным тяговым двигателем / В. И. Омеляненко, Н. Н. Калюжный, Т. А. Кулиш, Г. В. Кривякин // *Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы LXXVI международной конф.* – Днепропетровск: ДИИТ, 2006. – С. 123.
3. Шапран Е.Н. Совершенствование микропроцессорных систем управления с высоким использованием сил сцепления / Е.Н. Шапран // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 23. – С. 145 – 154.
4. Артеменко А.Н. Система автоматического выравнивания нагрузки тягового электропривода карьерного электровоза / А.Н. Артеменко // *Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайло Остроградського*. – Кременчук: КДН ім. Михайло Остроградського. – 2010. – Вип. 4. – Частина 3. – С. 56 – 58.
5. Припула М.Г. Моделирование та розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів / М. Г. Припула, Р. Р. Шаповал // *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. – 2007. – Вип. 5. – С. 139 – 145.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти томах. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и И.Д. Егунова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и томах. Т. 5: Методы современной теории управления / Под ред. К.А. Пупкова, И.Д. Егунова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.
8. Дмитриенко В.Д. Линеаризация математической модели привода методами дифференциальной геометрии / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 19. – С. 64 – 77.
9. Краснощёченко В.И. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза / В.И. Краснощёченко, А.П. Гриценко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с.