

При формуванні бази даних у файл записується інформація про тип Ateb-функції, параметри  $m$ ,  $n$ , обчислені значення та графічний вигляд функції.

### Висновки

1. Обґрунтовано використання останніх досягнень інформаційних технологій для забезпечення сучасного рівня захисту поліграфічної продукції.
2. Проаналізовано властивості періодичних Ateb-функцій.
3. Наведено типові Ateb-функції, які є вхідними для побудови захисних сіток.
4. Створено базу даних графічних примітивів на основі Ateb-функцій, яка є вхідною інформацією для програмного пакета побудови гільйошних елементів.

1. <http://www.compuart.ru>. 2. <http://www.securesoft.ru> 3. Грицик В.В., Назаркевич М.А. Математичні моделі алгоритмів і реалізація Ateb-функцій / Доповіді НАН України. – 2007. – № 12. С. 37 – 43. 4. Возний А.М. Застосування Ateb-функцій для побудови розв'язку одного класу істотно нелінійних диференціальних рівнянь / Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1970. – № 9. – С. 971–974. 5. Грицик В.В., Назаркевич М.А. Алгоритм табулювання Ateb-функцій // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. № 6(47). – С. 77–83. 6. І.М. Дронюк, М.А. Назаркевич Моделі перетворення періодичних Ateb-функцій у тригонометричний ряд Фур'є // Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2006. – № 565. – С. 155–159.

УДК 629.4

Р. Шпакович

Інститут прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я.С. Підстригача НАН України

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ РУХУ ПОЇЗДА

© Шпакович Р., 2008

**Здійснено числові дослідження впливу основних факторів на режимні і енерговитратні параметри руху поїзда. Основним розглянутим в роботі параметром, для якого запропоновано алгоритм ідентифікації, є тягові характеристики. Проведені дослідження дали можливість запропонувати підхід до побудови системи оперативного керування рухом поїзда.**

**The computational investigation of basic factors that have influence on operating conditions and energy parameters of train motion is shown in the paper. The basic parameters considered in the paper are hauling characteristics. The algorithm of identification of these parameters is proposed. Conducted investigation allows us to construct the train motion operative control system.**

### Вступ

В основу розроблення систем керування рухом поїзда покладено методи прогнозування, ідентифікації і оптимізації. Сьогодні першочерговим завданням для організації і технології перевезень є нормування параметрів тяги. Але апіорна інформація і математичне забезпечення правил тягових розрахунків не відображають реальної картини тяги і тому виявляються недостатніми для оптимізації технології тяги і організації руху поїздів. Відомо [1], що передбачення поведінки нелінійних систем в умовах невизначеності забезпечується шляхом побудови ідентифікаційних моделей на основі апостеріорної інформації і обчислювального процесу. Проте отримання такої інформації та її використання є непростим завданням. Його можна вирішити, якщо тягово-експлуатаційні випробування локомотивів проводитимуться для пошуку оптимальних рішень.

Сьогодні експлуатаційні випробування проводять на базі динамометричних вагонів. Як правило, ці випробування проводять як пасивний експеримент, фіксуючи параметри існуючої технології тяги. Потрібно проводити активний експеримент, коли керуючі впливи задаються наперед за певною програмою для пошуку оптимальних режимів тяги. Для розв'язування практично всіх задач, які належать до тяги поїздів, насамперед потрібно ідентифікувати параметри моделі. Тоді ці моделі можна використовувати для оптимізації, прогнозування і керування рухом. Параметри моделі умовно можна розбити на класи: параметри моделі, параметри стану локомотива, вагонів, зовнішнього середовища. На точність ідентифікації вказаних параметрів істотно впливають: модель руху поїзда, точність заміряних даних, точність задання траєкторії руху поїзда. У багатьох випадках система метрології, яка присутня в локомотивах, не є адекватною електродинамічним процесам, які проходять в електричних схемах і тягових двигунах локомотивів. І тому важливо в процесі оцінки факторів впливу запобігати неточностям вимірювання електродинамічних характеристик локомотива.

### Основні параметри моделі локомотива

Характеристики тягового режиму електровоза поділяються на електромеханічні, електротягові і тягові. Електромеханічними називаються характеристики тягових двигунів, віднесені до валу якоря, а саме:

$$n_{\partial} = f_1(I_{\partial}); M = f_2(I_{\partial}); \eta_{\partial} = f_3(I_{\partial}),$$

тобто, залежність числа обертання якоря  $n_{\partial}$ , моменту  $M$  і ККД  $\eta_{\partial}$  від струму  $I_{\partial}$  при постійному значенні  $U_{\partial}$  на клеммах двигуна.

Електротягові характеристики є віднесеними до ободу рухомого колеса, а саме:

$$v = f_4(I_{\partial}); F = f_5(I_{\partial}) \text{ і } \eta_e = f_6(I_{\partial}),$$

тобто, встановлюють залежність швидкості  $v$ , сили тяги  $F$  і ККД двигуна з передачею  $\eta_e$  від струму якоря  $I_{\partial}$ .

Електротягові характеристики розраховуються на основі електромеханічних характеристик тягового двигуна, заданого діаметра  $D$  рухомих коліс, передавального числа  $\mu$  і  $\eta_n$  — ККД передачі або  $\Delta P_n$  — втрат в передачі. Швидкісна характеристика локомотива розраховується за формулою

$$v = \frac{\pi D n 60}{100 \mu} = 0.188 \frac{D}{\mu} n \left[ \frac{\text{км}}{\text{год}} \right],$$

а дотичну силу тяги можна знайти із рівняння

$$F_{\partial} = 2 \frac{\mu}{D} M \eta_n = 0.367 \frac{U_{\partial} I_{\partial}}{v} \eta_n,$$

а  $\eta_e = \eta_{\partial} - \Delta P_n$ . Втрати в передачі можна знайти на основі даних табл. 1:

Таблиця 1

$I/I_{\text{зад}}$	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	1	1.25	1.5	2
$\Delta P_n$	0.085	0.067	0.044	0.032	0.027	0.025	0.027	0.030	0.035

Тягові характеристики  $v = f(F_k)$  отримують з електротягових вилученням  $I_{\partial}$ . При усталеному електричному режимі швидкість руху електровоза знаходять за формулою

$$v = \frac{U - Ir}{C\Phi}.$$

За відомого струму на вході двигуна його швидкість можна змінювати зміною напруги  $U$  на колекторі або зміною магнітного потоку  $\Phi$  тягового двигуна.

### Модель руху поїзда з розподіленою масою вздовж поїзда

Параметри руху поїзда  $v$ ,  $F_m$ ,  $B$  — швидкість руху, сила тяги та гальмівна сила — задовольняють рівняння

$$\frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{(1+\gamma)(\vec{F}_m \pm \vec{W}_k - \vec{B})}{Q+P},$$

за обмежень

$$v \leq v_m(s), \quad \tau_\infty(1 - e^{t/T}) + \tau_0 e^{t/T} \leq T_m,$$

де  $\vec{F}_m(I)$  — тягова сила;  $\vec{B}$  — гальмівна сила;  $Q$  — вага вагонів;  $P$  — вага локомотива;  $\tau_0$  — різниця між температурою обмоток тягових двигунів і температурою повітря;  $\tau_\infty$ ,  $T$  — значення теплових параметрів, що залежать від величини струму, який використовує тяговий двигун;  $T_m$  — максимально допустима температура нагрівання обмоток тягових двигунів;  $\gamma$  — коефіцієнт обертових мас поїзда;  $\vec{W}_k = \vec{F}_{on} + \vec{F}_{ood}(i_k, R, T_p, V_b, n)$ , де  $\vec{F}_{ood}$  — сила додаткового опору, яка залежить від ухилу  $i_k$ , радіуса кривизни  $R$  траєкторії переміщення, температури повітря  $T_p$ , швидкості зустрічного вітру  $V_b$ , кількості увімкнених підвагонних генераторів  $n$ ;  $t$  — час.

Основний опір рухові рухомого складу визначається емпіричними формулами та залежить від маси  $m$  та швидкості  $v$  для локомотивів, а для вагонів і кількістю осей  $k_{o.e.}$ :

$$F_{on.l.} = f_{on.l.}(m, v), \quad F_{on.e.} = f_{on.e.}(m, v, k_{o.e.}).$$

Траєкторія руху поїзда задається у просторових координатах. Вона складається з послідовності лінійних і криволінійних елементів. Лінійні елементи визначаються ухилом  $i_j$  і довжиною  $l_{nj}$ , криволінійні — довжиною  $l_{kj}$  і радіусом кривизни  $R_j$ . Вздовж траєкторії руху задається максимально допустима швидкість руху  $v_m(s)$ .

#### Дослідження впливу різних факторів на час руху та енерговитрати поїзда

Керування рухом поїзда здійснюється чергуванням режимів тяги, холостого ходу та гальмування. Режим тяги може відбуватися за різних тягових позицій.

Вплив коефіцієнтів моделі на режимні параметри руху поїзда досліджено за допомогою розробленого програмного комплексу. Всі результати числового моделювання наведено у таблицях. Короткий аналіз результатів викладено відразу після відповідної таблиці.

Таблиця 2

#### Вплив $\gamma$ -коефіцієнта інерції обертових мас поїзда

$\gamma$	Час руху поїзда, t (хв)	Енерговитрати, E (кВт.год)	Додатковий час руху поїзда, $\Delta t/t \cdot 100\%$	Додаткові енерговитрати, $\Delta E/E \cdot 100\%$
ділянка «Красне — Львів» (50 км)				
0	38,15	1773,72	—	—
0,05	38,20	1784,39	0,131	0,602
0,10	38,26	1794,57	0,288	1,175
0,15	38,35	1804,60	0,524	1,741
ділянка «Мукачеве — Лавочне» (80 км)				
0	84,98	4679,99	—	—
0,05	85,22	4696,54	0,282	0,354
0,10	85,30	4712,14	0,377	0,687
0,15	85,29	4712,70	0,365	0,699
ділянка «Лавочне — Мукачеве» (80 км)				
0	81,29	1395,00	—	—
0,05	81,54	1422,66	0,308	1,983
0,10	81,57	1439,58	0,344	3,196
0,15	81,57	1450,87	0,344	4,005

На ділянці «Лавочне — Мукачеве» (спуск з перевалу) збільшення коефіцієнта інерції обертових мас має більший вплив, ніж на підйомі на перевал. Оскільки на спуску споживана електроенергія витрачається тільки на збільшення швидкості, а на підйомі тягові двигуни працюють постійно і інерційність не значно впливає на параметри руху.

Таблиця 3

**Вплив частоти зміни режиму тяги**

Ширина «коридору швидкості», $\Delta v/v$	Час руху поїзда, t (хв)	Енерговитрати, E (кВт.год)	Додатковий час руху поїзда, $\Delta t/t \cdot 100\%$	Зекономлені енерговитрати, $\Delta E/E \cdot 100\%$
<i>ділянка «Красне — Львів» (50 км)</i>				
0,05	38,31	1907,68	–	–
0,10	38,46	1906,80	0,392	0,046
0,15	38,75	1892,16	1,149	0,814
0,20	38,94	1876,14	1,644	1,653
<i>ділянка «Мукачеве — Лавочне» (80 км)</i>				
0,05	88,17	5163,98	–	–
0,10	89,50	5140,81	1,508	0,449
0,15	91,28	5144,27	3,527	0,382
0,20	93,58	5113,64	6,136	0,975
<i>ділянка «Лавочне — Мукачеве» (80 км)</i>				
0,05	79,99	1526,01	–	–
0,10	81,74	1525,82	2,188	0,0128
0,15	83,64	1549,35	4,563	-1,529
0,20	85,72	1550,23	7,163	-1,587

На гірських ділянках («Мукачеве — Лавочне») режим ведення поїзда змінюється часто. Швидкість руху постійно коливається між допустимими значеннями (у «коридорі швидкості»). Тому ширина коридору на цих ділянках більше впливає на час руху, ніж на ділянці «Красне — Львів». Це пов'язано з малою кількістю перехідних режимів.

Таблиця 4

**Вплив коефіцієнта стану електродвигунів локомотива**

Коефіцієнту стану електродвигунів локомотива	Час руху поїзда, t (хв)	Енерговитрати, E (кВт.год)	Додатковий час руху поїзда, $\Delta t/t \cdot 100\%$	Додаткові енерговитрати, $\Delta E/E \cdot 100\%$
<i>ділянка «Красне — Львів» (50 км)</i>				
1	38,31	1830,26	–	–
0,95	38,46	1906,80	0,392	4,182
0,90	38,64	1987,84	0,861	8,610
0,85	38,73	2086,09	1,096	13,98
<i>ділянка «Мукачеве — Лавочне» (80 км)</i>				
1	86,09	4883,87	–	–
0,95	89,50	5140,81	3,961	5,261
0,90	96,90	5509,83	12,56	12,82
0,85	107,44	6043,29	24,80	23,74
<i>ділянка «Лавочне — Мукачеве» (80 км)</i>				
1	81,55	1461,96	–	–
0,95	81,74	1525,82	0,233	4,368
0,90	82,55	1625,05	1,226	11,16
0,85	84,61	1709,96	3,752	16,96

На ділянці «Мукачеве — Лавочне» спостерігається постійний підйом на перевал. Розрахунки показують, що стан двигунів істотно впливає на час і на енерговитрати. При русі в зворотному напрямку (спуск з перевалу) вплив стану двигунів локомотива на час руху є незначним.

Таблиця 5

$\eta_0$  зміна напруги в межах 2500 – 3000 В.

Відношення фактичної напруги до номінальної	Час руху поїзда, t (хв)	Енерговитрати, E (кВт.год)	Додатковий час руху поїзда, $\frac{\Delta t}{t} \cdot 100\%$	Додаткові енерговитрати, $\frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%$
ділянка «Красне — Львів» (50 км)				
1	42,91	1488,12	–	–
2800 / 3000	43,28	1580,08	0,862	6,180
2650 / 3000	43,57	1640,59	1,538	10,25
2500 / 3000	43,90	1734,07	2,307	16,53
ділянка «Мукачеве — Лавочне» (80 км)				
1	88,41	4017,31	–	–
2800 / 3000	90,88	4074,13	2,794	1,414
2650 / 3000	92,06	4076,11	4,128	1,464
2500 / 3000	94,61	4219,77	7,013	5,040
ділянка «Лавочне — Мукачеве» (80 км)				
1	82,97	1066,25	–	–
2800 / 3000	83,31	1088,09	0,410	2,048
2650 / 3000	83,53	1149,49	0,675	7,807
2500 / 3000	84,07	1183,34	1,326	10,98

Зміна напруги істотно впливає на швидкість руху поїзда на зтяжних підйомах. Зменшення напруги на клеммах двигунів приводить до того, що тягові електродвигуни повинні працювати на вищих позиціях. Це у багатьох випадках збільшує енерговитрати, зменшує маскимально допустиму масу поїзда і вимагає використання додаткової тяги.

**Ідентифікація опірних та силових характеристик**

Сила опору рухові обчислюється за формулою

$$W = (W' + W'') K_{nm} K_g + W_i + W_r + W_{nz} + W_{pyu},$$

де  $W'$  та  $W''$  — основні опори локомотивів та вагонів відповідно;  $K_{nm}$  та  $K_g$  — коефіцієнти опору внаслідок низької температури та наявності вітру;  $W_i$  — опір від ухилу ( $W_i = \pm img$ , де  $\pm i$  — значення ухилу ділянки руху в проміле (%),  $m$  — маса вагона (локомотива));  $W_r$  — опір, зумовлений кривизною траєкторії;  $W_{nz}$  — опір від підвагонних генераторів;  $W_{pyu}$  — опір при рушанні з місця.

Функції  $K_{nm}(v)$ ,  $K_g(v)$  і  $W_{nz}(v)$  відомі. Вважатимемо, що опір, зумовлений кривизною траєкторії, дорівнює нулеві. Функції основних опорів мають вигляд

$$W' = m(a + bv + cv^2),$$

тоді сила опору запишеться так:

$$W = \left( m_0(a_0 + b_0v + c_0v^2) + \sum_{k=1}^n m_k(a_k + b_kv + c_kv^2) \right) K_{nm}(v) K_g(v) + \sum_{k=0}^n i_k m_k g + W_{nz}(v) = \\ = (A + Bv + Cv^2) K_{nm}(v) K_g(v) + \sum_{k=0}^n i_k m_k g + W_{nz}(v),$$

де  $m_0$  та  $m_k$  — маси локомотива та вагонів,  $a_0, b_0, c_0, a_k, b_k, c_k$  — коефіцієнти опору,  $i_k$  — ухил ділянки, на якій знаходиться  $k$ -й вагон чи локомотив ( $k=0$ ).

Провівши не меншу кількість замірів, ніж невідомих коефіцієнтів миттєвої швидкості та прискорення в режимі холостого ходу, отримаємо систему лінійних рівнянь для знаходження невідомих  $A, B, C$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} (A + Bv_1 + Cv_1^2) K_{um}(v_1) K_e(v_1) + \sum_{k=0}^n i_{k,1} m_k g + W_{nz}(v_1) = \sum_{k=0}^n m_k a_1 \\ \dots \\ (A + Bv_m + Cv_m^2) K_{um}(v_m) K_e(v_m) + \sum_{k=0}^n i_{k,m} m_k g + W_{nz}(v_m) = \sum_{k=0}^n m_k a_m \end{array} \right. ,$$

яку розв'язуємо методом найменших квадратів. Так знайдемо реальні параметри функції опору рухові.

Силу тяги локомотива  $F_m(p, v)$  ( $p$  — номер позиції тягового двигуна) запишемо у вигляді

$$F_m(p, v) = a_p + b_p v + c_p v^2.$$

Коефіцієнти  $a_p, b_p, c_p$  для кожного значення  $p$  знаходимо з рівняння

$$F_m(p, v) - W(v) = ta$$

провівши заміри швидкості і прискорення для кожної позиції тягового двигуна. Отже, в процесі переміщення поїзда можна уточнювати параметри тягових і опірних характеристик локомотива і поїзда. Це дасть можливість точніше прогнозувати параметри керування і проводити оптимізувати руху поїзда на реальних вхідних даних.

### Висновки

Запропоновано підхід до ідентифікації параметрів моделі руху поїзда. Проведені дослідження впливу різних факторів на час та енерговитрати переміщення поїзда показали, що зв'язок між ними є неоднозначним. Він істотно залежить як від режиму руху, так і від параметрів траєкторії переміщення поїзда.

1. Деев В.В., Ильин Г.А., Афонин Г.С. Тяга поездов. — М.: Транспорт, 1989. — 264 с.
2. Афанасьев В.Н. Математическая теория конструирования систем управления. — М.: Высш. школа, 2003. — 614 с.