

УДК 621.313

БЛИНДЮК В.С., к.т.н., доцент (УкрДАЗТ).

## Моделювання пускових хатактеристик тягових двигунів моторвагонних рухомих одиниць

---

### Вступ, аналіз публікацій, формулювання задачі дослідження

---

Автоматична система керування моторвагонним рухомих складом (АСК МРС) повинна включати в себе пристрій регулювання струму (ПРС) тягового електричного двигуна (ТЕД). З урахуванням безпосереднього механічного зв'язку валу ТЕД з колесом вагона через редуктор та пружну муфту, від створюваного двигуном електромагнітного моменту  $M_{EM}$  напряму залежать характеристики руху МРС [1, 2]. В свою чергу, значення  $M_{EM}$  обумовлюється струмом ТЕД, тому розробці методів та засобів його регулювання приділяється значна увага [3].

Найбільш поширеними засобами регулювання тягового струму є різновиди дискретного методу, зокрема – реостатного [4]. При цьому на етапі проектування визначається оптимальний пусковий струм ТЕД за множиною критеріїв, зокрема відсутності буксування МРС, припустимого перегріву, прискорення, струму тощо. Відповідно цьому методу, в процесі торгання з місця послідовно до тягового двигуна підключені реостати, які обмежують значення пускового струму. При подальшому нарощуванні швидкості тяговий струм зменшується. Цей факт фіксується датчиком – реле прискорення, яке послідовно, зі збільшенням швидкості, автоматично вимикає реостати. Кінцевим результатом таких дій є вихід ТЕД на безреостатну (природну) характеристику. Ді-

аграму зміни тягового струму, як її наведено в роботі [5], представлено на рис. 1.

Слід відзначити, що дискретне регулювання призводить до різких змін струму (див. рис. 1), наслідком цього є зменшення ресурсу електромеханічних вузлів МРС та погіршення комфорту пасажирів. Для усунення цього недоліку в сучасному рухомому складі застосовується більша кількість позицій дискретного регулювання або виконується тиристорне регулювання струму при широтно-імпульсній модуляції виконавчого пристрою [6, 7]. Але використання цих засобів приводить до збільшення гармонік тягового струму, які негативно впливають на електричну мережу та пристрої СЦБ.

З іншого боку, наразі існують потужні транзистори (наприклад, IGBT [8]), які на відміну від ключових елементів – тиристорів, дозволяють виконувати аналогове регулювання тягового струму з мінімальною кількістю гармонічних складових.

Узагальнюючи викладене слід зауважити, що застосування як дискретного так і аналогового методів регулювання тягового струму ґрунтується на моделюванні характеристик ТЕД. При цьому в першому випадку здебільше достатньо моделі, яка відтворює природну характеристику тягового двигуна. В другому – необхідно виконувати загальне моделювання, яке враховує характеристики ТЕД в різних реостатних режимах роботи, при цьому опір реостату повинен бути представлений аналоговою функцією часу.

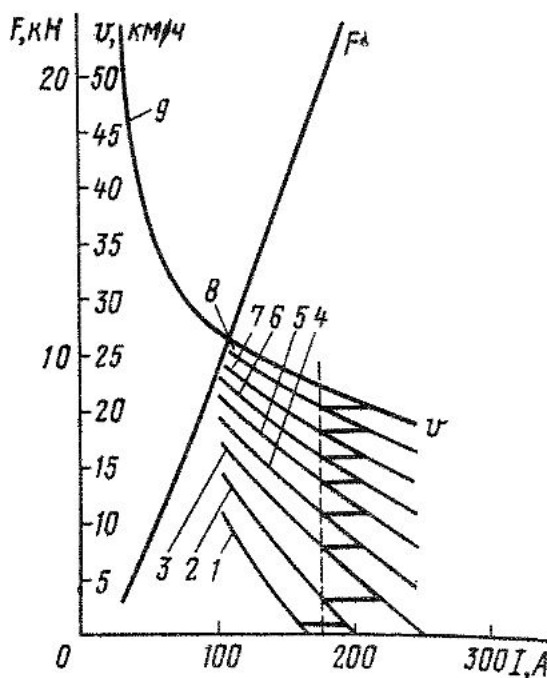


Рис. 1. Діаграма зміни пускового тягового струму

Слід зауважити, що виконання останньої вимоги є досить нетривіальною задачею [1]. Аналіз методів її аналітичного вирішення виявив низку проблем, пов'язаних зі складністю розрахунків, потребою у вимірюванні індивідуальних параметрів ТЕД, які з кожним конкретним екземпляром дещо змінюються, необхідністю врахування деяких апріорно не визначених характеристик [9].

### Задача дослідження

Моделювання пускових характеристик тягових електричних двигунів моторвагонного рухомого складу з урахуванням їх власних особливостей.

### Основний матеріал

На діаграмі зміни пускового тягового струму (див. рис. 1) зображений початок руху МРС з урахуванням переходу на наступні реостатні позиції. Наприкінці, коли швидкість руху досягає приблизно двадцяти кілометрів на годину, тяговий двигун починає функціонувати на приро-

дній (безреостатній) характеристиці – 9. На діаграмі зображено її частину, яка реально реалізується.

Розглянемо фізично не відтворювану частину природної характеристики до пересічення з віссю абсцис. Вочевидь, значення цієї точки обумовлене загальним активним опором ТЕД (обмоток якоря, головних та додаткових полюсів), яке наводиться в довідкових даних для конкретного типу двигуна [10], та діючим значенням постійної напруги. Наприклад, для тягового двигуна типу УРТ-110Б при напрузі 750 В, струм  $I_0^{Pr}$  дорівнює 1800 А.

Розглядаючи природну характеристику ТЕД в часі, перейдемо до деякої функції  $I^{Pr}(t)$ . На цьому етапі дослідження приймемо, що для  $I^{Pr}(t)$  конкретні значення часу, за винятком нульового, не визначені. Тоді, з урахуванням довідкової інформації [10], та наведеного в

роботі [5],  $I^{Pr}(t)$  для ТЕД УРТ-110Б

при напрузі 750 В, приймає вигляд, наведений на рис. 2.

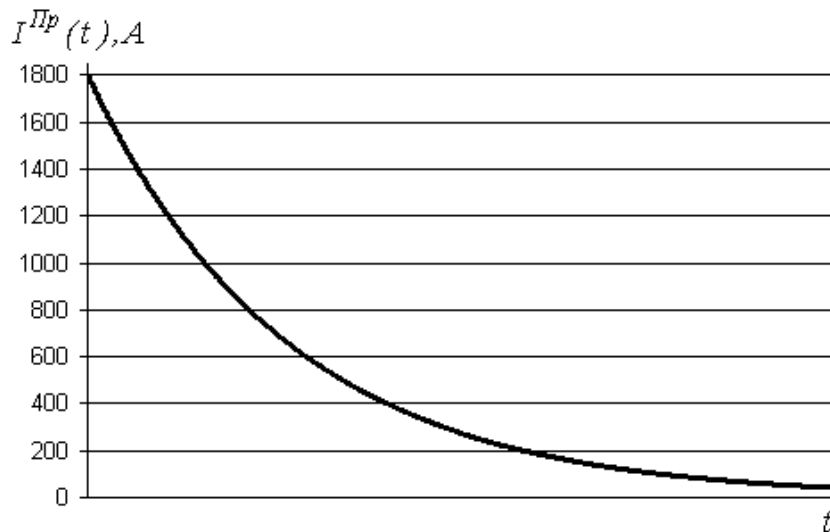


Рис. 2. Графік зміни пускового струму ТЕД УРТ-110Б в часі

З іншого боку, відповідно положенням класичної теорії автоматичного регулювання, щільнісна функція відклику  $H(f)$  зв'язує змінні входу  $X(f)$  та виходу  $Y(f)$  системи наступним чином [11]:

$$Y(f) = H(f)X(f). \quad (1)$$

Це рівняння отримуємо результатом застосування перетворення Фур'є до обох частин рівняння [11]:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau, \quad (2)$$

де  $h(\tau)$  - імпульсна характеристика системи, тобто реакція системи на дельта-функцію Дірака -  $\delta(t)$ . Для систем, які можуть бути фізично реалізовані, нижня межа інтегрування дорівнює нулю.

Припустимо, що функція зміни струму  $I^{Пp}(t)$  є імпульсною характеристикою тягового електричного двигуна

$h_{ТЕД}(\tau)$  з додаванням нульового значення, тобто

$$h_{ТЕД}(0) = 0 \quad \text{та} \\ h_{ТЕД}(t + 1) = I^{Пp}(t). \quad (3)$$

Застосовуючи комплексне пряме перетворення Фур'є ( $F^+$ ), отримуємо

$$H_{ТЕД}(f) = F^+[h_{ТЕД}(\tau)] = |H_{ТЕД}(f)|e^{j\varphi(f)}, \quad (4)$$

де  
 $|H_{ТЕД}(f)| = \sqrt{(Re[H_{ТЕД}(f)])^2 + (Im[H_{ТЕД}(f)])^2}$   
 - амплітуди спектральних складових;  
 $\varphi(f) = \arctg \frac{Im[H_{ТЕД}(f)]}{Re[H_{ТЕД}(f)]}$  - їх

фаза;  $Re, Im$  - реальна та уявна складові комплексного спектру відповідно.

На основі виразів (1) – (3), застосовуючи пряме перетворення Фур'є  $F^+$  для переходу в частотну, та зворотнє  $F^-$  для переходу в часову області, отримуємо модель у вигляді виразу (5), яка зв'язує

вхідний сигнал керування  $x(t)$  з вихідним  $y(t)$ . Причому останній чинник є функцією зміни струму ТЕД як результат реакції на  $x(t)$ .

$$y(t) = F^- [H_{ТЕД}(f) \cdot F^+ [x(t)]] \quad (5)$$

Аналітичний вираз (5) дозволяє виконувати теоретичні розрахунки в безперервному часі при однозначно визначених функціях  $h_{ТЕД}(\tau)$  та  $x(t)$ . Але з причин, наведених у вступній частині роботи, це досить нетривіальна задача. З точки зору практичної доцільності, слід перейти до дискретного часу  $t_i$ , де  $i = 0, 1, \dots, N$  та до застосування дискретного перетворення Фур'є:  $DFT_N^+$ ,  $DFT_N^-$  - прямого та зворотного відповідно. Вважаємо, що кінцеве значення часу  $t_i$  та розрядність  $DFT$  - перетворення співпадають і дорівнюють  $N$ .

З урахуванням сформованих обмежень вираз (5) перетворюється до наступного

$$\overline{y(t_i)} = DFT_N^- [DFT_N^+ [\overline{h_{ТЕД}(t_i)}] \cdot DFT_N^+ [\overline{x(t_i)}]] \quad (6)$$

де  $\overline{x(t_i)}$  - вхідний сигнал керування у вигляді вектору дискретних значень в моменти часу  $t_i$ ;  $\overline{y(t_i)}$  - вектор вихідних значень струму ТЕД;  $\overline{h_{ТЕД}(t_i)}$  - дискретна імпульсна характеристика.

Результатом прямого  $DFT$  - перетворення є вектор комплексних значень розмірністю  $N$ , тоді

$$\overline{y(t_i)} = DFT_N^- [\overline{h_{ТЕД}(Re_i, Im_i)} \cdot \overline{x(Re_i, Im_i)}] \quad (7)$$

де у квадратних дужках – операція векторного множення елементів комплексних спектрів імпульсної характеристики та вхідного сигналу в частотній області. Результатом множення є вектор

$$\overline{M(Re_i, Im_i)} = \overline{h_{ТЕД}(Re_i, Im_i)} \cdot \overline{x(Re_i, Im_i)}$$

розмірністю  $N$ . Тоді вираз (7) набуває вигляду

$$\overline{y(t_i)} = DFT_N^- [\overline{M(Re_i, Im_i)}] \quad (8)$$

В свою чергу, результатом зворотного  $DFT$  - перетворення є вектор комплексних значень  $\overline{y'(Re_i, Im_i)}$ . Тоді перехід до часової області, в якій представлено вектор  $\overline{y(t_i)}$ , здійснюється відповідно наступному виразу

$$\overline{y(t_i)} = \sqrt{y'(Re)^2 + y'(Im)^2} \quad (9)$$

Моделювання зміни тягового струму ТЕД, яке наведено у вигляді виразів (6) – (9), представляє собою послідовність обчислень для визначення  $\overline{y(t_i)}$  за апріорно встановленими значеннями векторів  $\overline{x(t_i)}$  та  $\overline{h_{ТЕД}(t_i)}$ .

Оцінку адекватності моделювання виконаємо на основі порівняння розрахованих значень та наведених в довідковій літературі [5, 10] для електропоїзда ЭР2 з ТЕД типу УРТ-110Б. Відповідно наведеному в [5], спрощена схема з'єднання пускових резисторів та ТЕД має вигляд, наведений на рис. 3.

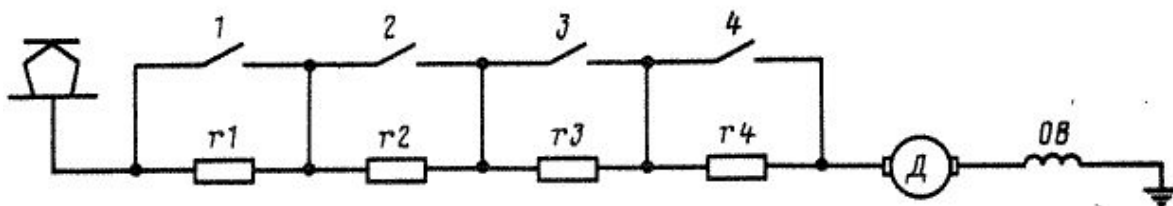


Рис. 3. Спрощена схема з'єднання пускових резисторів та ТЕД

Діаграму зміни пускового струму МРС, як її наведено в роботі [5], представлено на рис. 4.

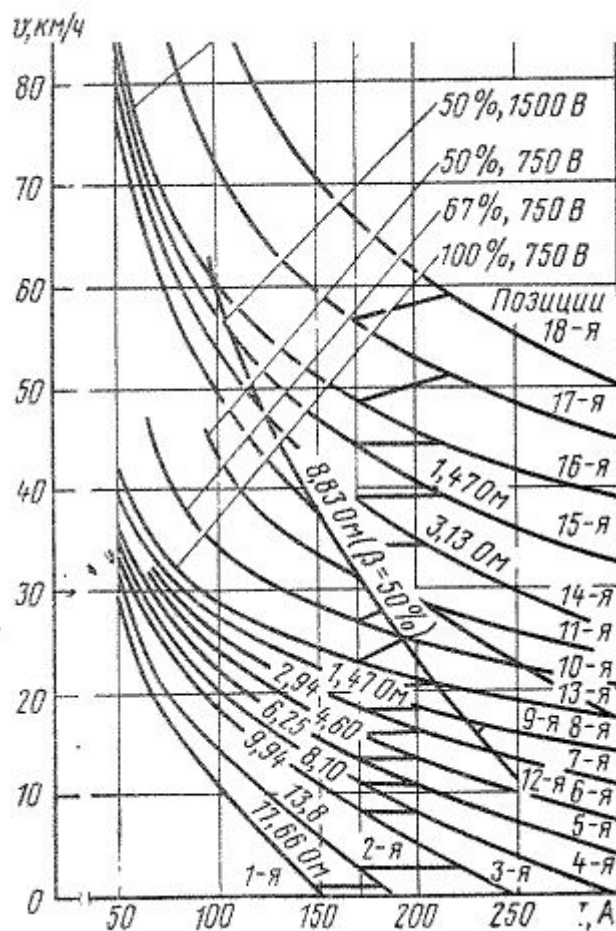


Рис. 4. Пускові характеристики моторного вагону ЭР2

На рисунку наведені значення опорів при автоматичному переході на відповідну реостатну характеристику. При цьому перемикання виконується по мірі збільшення швидкості руху та зменшення тягового струму. Дев'ята позиція є природною (безреостатною).

Перехід на першу характеристику відбувається в момент часу  $T_1$ , при цьому значення тягового струму складає 150 (А), або 0,083 від  $I_0^{Pr}$ . Встановивши розмірність  $N = 1024$  та виконавши моделю-

вання у відповідності до виразів (6) – (9), отримуємо вектор вихідних значень тягового струму ТЕД  $\overline{y(t_i)}$  для цієї реостатної характеристики, який у вигляді безперервної функції часу наведений на рис. 5.

Відповідно до [5] (див. рис. 4), перехід до другої реостатної характеристики здійснюється в момент часу  $T_2$ , коли в

процесі зменшення тягового струму він набуває значення 145 (А). В результаті перемикання реостатів струм миттєво збільшується до 180 (А), тобто 0,1 від  $I_0^{Pr}$ , або на 0,017 від попереднього значення. При цьому  $\overline{y(t_i)}$  набуває вигляду, наведеного на рис. 6.

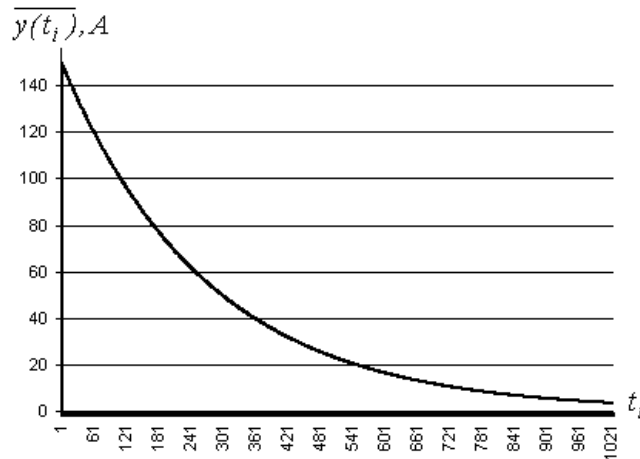


Рис. 5. Значення вектору  $\overline{y(t_i)}$  для першої реостатної характеристики

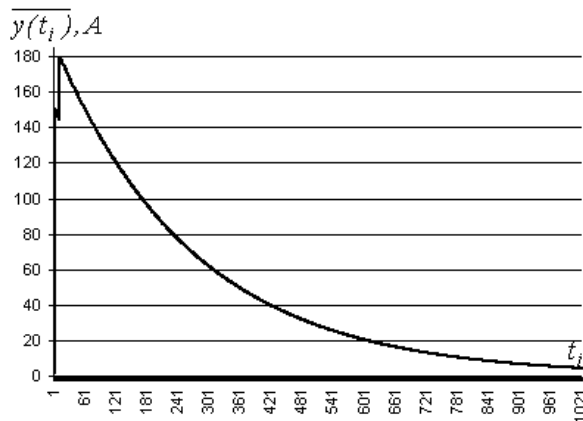


Рис. 6. Значення вектору  $\overline{y(t_i)}$  після переходу з першої на другу реостатну характеристику

Аналогічним чином моделюється перехід до третьої реостатної характеристики в момент часу  $T_3$ , коли в процесі зменшення тягового струму він набуває значення 175 (А). В результаті перемикання реостатів струм миттєво збільшу-

ється до 230 (А), тобто 0,128 від  $I_0^{Pr}$ , або на 0,03 від попереднього значення. Значення  $\overline{y(t_i)}$  наведені на рис. 7.

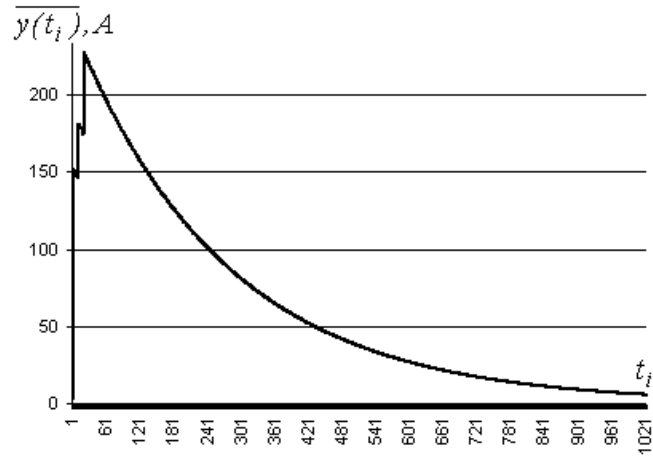


Рис. 7. Значення вектору  $\overline{y(t_i)}$  після переходу з другої на третю реостатну характеристику

Розрахувавши подібним чином переходи на наступні реостатні характеристики, отримуємо значення вектору  $\overline{y(t_i)}$ , які для наочності суміщені з пусковими характеристиками моторного ва-

гону ЭР2, з урахуванням припущень за значеннями фактичного нарощування швидкості руху та зі значеннями вхідного вектора  $\overline{x(t_i)}$  (рис. 8).

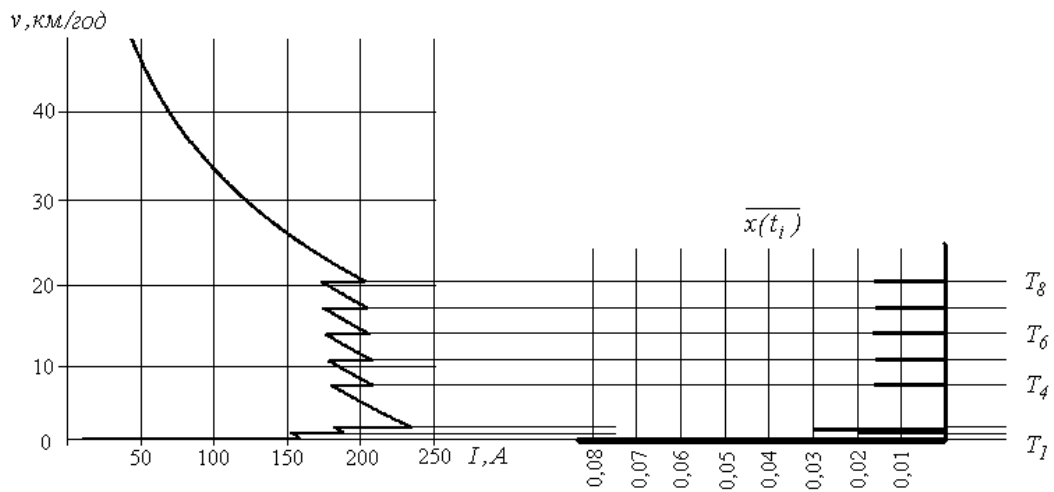


Рис. 8. Вектор  $\overline{y(t_i)}$  після реалізації послідовних переходів з суміщенням відповідних реостатних характеристики зі значеннями вхідного вектору  $\overline{x(t_i)}$

Як видно з рис. 8, він повністю повторює пускові характеристики моторного вагону ЭР2, наведені на рис. 4 при русі з напругою 750 В, яка подається на ТЕД.

Загальна похибка моделювання складається з двох чинників:

$\delta^A = \sum_{i=1}^N \delta_i^A$  - сумарної похибки апроксимації імпульсної характеристики  $\overline{h_{ТЕД}(t_i)}$ ;  $\delta^{DFT} = \frac{I_0^{Пр}}{N}$  - похибки дискретизації. Для розглянутого прикладу

останній чинник набув наступного значення:

$$\delta^{DFT} = \frac{1800}{1024} = 1,7578125(A).$$

Розглянемо зміст вхідного вектору  $\overline{x(t_i)}$ . Так, кожне його значення показує, на скільки потрібно збільшити (зменшити) тяговий струм ТЕД в момент часу  $t_i$ ,

тобто 
$$\overline{x(t_i)} = \frac{y^{\Pi}(t_i) - y^{\Delta}(t_i)}{I_0^{\Pi p}},$$
 де

$y^{\Pi}(t_i)$ ,  $y^{\Delta}(t_i)$  - потрібне та діюче значення струму відповідно.

З точки зору практичної реалізації моделі, зміст вхідного вектору  $\overline{x(t_i)}$  представляє собою сигнал керування, який надходить на пристрій регулювання струму ТЕД. Втілення результатів моделювання, які розглянуті на прикладі пускових характеристик моторного вагону ЭР2 (див. рис. 8), приведе до отримання результатів, подібних автоматичному переходу на наступні реостатні позиції в процесі початку руху та нарощуванню швидкості МРС. При цьому будуть спостерігатися такі ж різкі прискорення вна-

слідок значної зміни струму ТЕД. Для усунення подібного явища необхідно доповнити  $\overline{x(t_i)}$  проміжними значеннями зміни струму. Так, наприклад, якщо потрібно у  $2k$  разів зменшити викиди струму в порівнянні з розрахованими для моторного вагону ЭР2 (див. рис. 8), то вектор  $\overline{x(t_i)}$  потрібно перетворити наступним чином

$$\overline{x'(t_i)} = \begin{cases} \frac{x(t_i)}{2k}, & \text{якщо } x(t_{P_s}) \neq 0 \\ \frac{x(t_{i-1}) - x(t_{i-P_s})}{2k}, & \text{якщо } i = \frac{P_s - i}{2k} \end{cases}, \quad (10)$$

де  $P_s$  - значення  $t_i$ , де  $x(t_i) \neq 0$ ;  $k = 1, 2, \dots, K$  - розрядність згладжування значень вектора  $\overline{x(t_i)}$ .

Встановивши  $k = 1$  та виконавши розрахунки значень  $\overline{x'(t_i)}$  відповідно (6) - (10), отримуємо значення  $\overline{y'(t_i)}$ , які представлені на рис. 9.

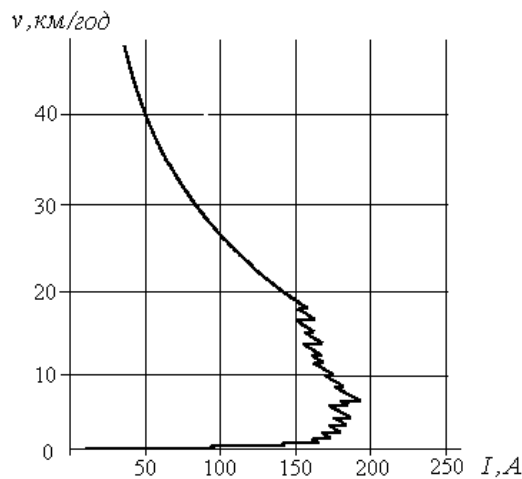


Рис. 9. Значення вектору  $\overline{y'(t_i)}$  після згладжування значень  $\overline{x(t_i)}$



Як видно з рис.9, викиди струму при регулюванні стали значно меншими в порівнянні з  $\overline{y(t_i)}$  (див. рис. 8), їх значення не перевищує 50 (А).

Подальше зменшення викидів досягається збільшенням значень  $k$  у виразі (10), але можливе дещо інше рішення. Розглянувши вирази (1) - (6), та взявши до уваги зворотність перетворення Фур'є, слід зробити висновок про можливість вирішення зворотної задачі: визначення  $\overline{x(t_i)}$  за апіорно встановленим  $\overline{y(t_i)}$ . В такій постановці вона найбільш актуальна при синтезі автоматичної системи керування МРС в частині формування сигналу керування пристроєм регулювання струму ТЕД. Для вирішення зворотної задачі вирази (1), (5), (6) перетворюються наступним чином

$$X(f) = Y(f) / H(f), \quad (11)$$

$$x(t) = F^- [F^+ [y(t)] / H_{ТЕД}(f)], \quad (12)$$

$$(12)$$

$$\overline{x(t_i)} = DFT_N^- [DFT_N^+ [\overline{y(t_i)}] / DFT_N^+ [h_{ТЕД}(t_i)]] . \quad (13)$$

$$(13)$$

Для прикладу, який розглядається (МРС ЭР2), сформулюємо зворотну задачу, як визначення керуючої послідовності у вигляді вектору  $\overline{x(t_i)}$  для зміни струму, представленого вектором  $\overline{y(t_i)}$  (рис. 10). Значення елементів  $\overline{y(t_i)}$  розраховані за умовою приблизно постійного прискорення в процесі початку руху МРС (за винятком перших моментів часу).

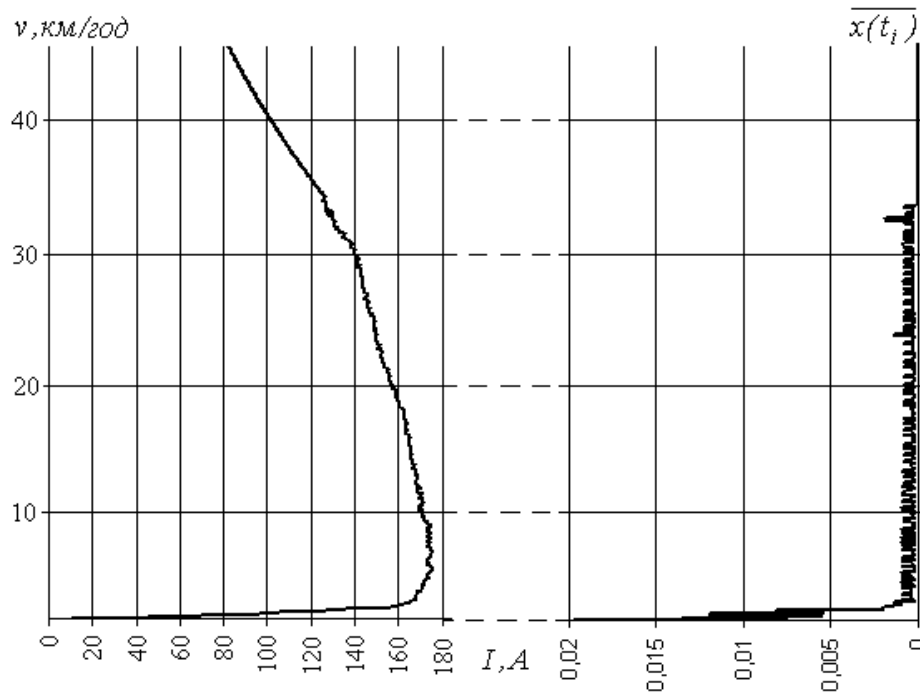


Рис. 10. Розраховані значення  $\overline{x(t_i)}$  при вирішенні зворотної задачі

За змістом значення вектору  $\overline{x(t_i)}$  представляють собою похідну зміни опору переходу IGBT-транзистора, який регулює значення струму ТЕД. Цим обумо-

влено використання інтегруючої ланки в схемі регулювання (рис. 11).

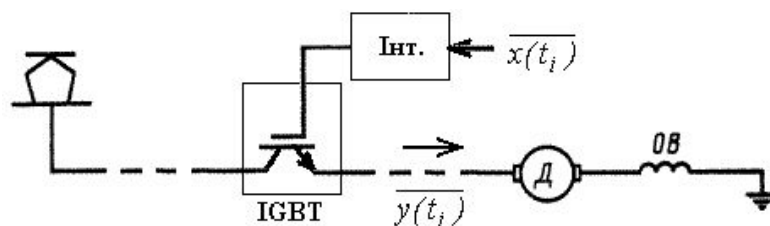


Рис. 11. Спрощена схема регулювання струму ТЕД IGBT-транзистором

### Висновок

В роботі знайшли подальший розвиток окремі положення теорії електричної тяги в частині моделювання пускових характеристик ТЕД із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є, що дозволяє оптимізувати процес регулювання тягового струму на основі застосування сучасних електронних компонентів.

### Література

1. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги: Учебник для вузов ж.-д. трансп. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, – 1983. – 328 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1978. – 832 с.
3. Pore J. Automatic Train Operation \\\ J. Pore \ Signal und Draht, – 2010, – № 7-8. – S. 36-40
4. Руководство по устройству электропоездов серии ЭР2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М. / Под ред. Пегова Д.В., Бурцева П.В., Андреева В.Е., М.: Центр Коммерческих Работок, – 2003. – 184 с.
5. Цукало П.В., Ерошкин Н.Г. Электропоезда ЭР2, ЭР2Р. – М.: Транспорт, – 1986. – 359 с.
6. Mayer L. Valutazione della fattibilita di una sistema di trazione elettrica a 12 kV corrente continua // Mayer L., Ventura O. / Ingegneria Ferroviaria. – 1988. – №5. – P. 18-36
7. Пат. 2385237 Российская Федерация. Преобразовательная система / Андросов Н. Н., Бабкина Т. Н., Булатов В. Л.,

Головин В. И. и др.; заявитель и собственник Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова"; заявл. 2008147979/11, 04.12.2008; опубл. 27.03.2010.

8. Laska V. Traction systems for El.Mult. units motor cars with DC 3kV line voltage / 3-rd. Int. Conference Drives and supply systems for modern electric traction. – Warsaw, – 1997. – P.23-38

9. Блиндюк В.С. Дискретне динамічне моделювання електричних машин тягового рухомого складу (частина 1) / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць ДонІЗТ. Випуск 28, – Донецьк, – 2011, – С. 202-210.

10. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам. Под ред. А.И. Тищенко. – М.: Транспорт, – 1976. – 432 с.

11. Иванов В.А., Медведев В.С., Чемоданов Б.К. Математические основы теории автоматического регулирования. Учеб. пособие для вузов. Под. ред. Б.К. Чемоданова. М.: Высшая школа, – 1971. – 808 с.

### Анотації:

В работе представлены результаты моделирования пусковых характеристик тягового электрического двигателя на основе применения прямого и обратного преобразования Фурье.

В роботі представлені результати моделювання пускових характеристик тягового електричного двигуна із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є.

In work presented results of modeling of activate features of tractive electrical engine on the base of using of direct and reconversion Fourier.