

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**Методичні вказівки**  
**для виконання курсової роботи**  
**на тему «Моделювання процесів перетворення енергії в тяговому**  
**електроприводі з накопичувачем енергії на приміському електропоїзді»**  
з дисципліни «Інформаційні технології на транспорті»  
для студентів спеціальності 273 Залізничний транспорт,  
спеціалізації 141.11 Електричний транспорт  
усіх форм навчання

Затверджено на засіданні кафедри  
електричного транспорту та  
тепловозобудування  
протокол №1 від 30.08.2019р.

Харків 2019

Методичні вказівки для виконання курсової роботи на тему «Моделювання процесів перетворення енергії в тяговому електроприводі з накопичувачем енергії на приміському електропоїзді» з дисципліни «Інформаційні технології на транспорті» для студентів спеціальності 273 Залізничний транспорт, спеціалізації 141.11 Електричний транспорт усіх форм навчання / уклад. Л. В. Овер'янова – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 16 с.

Укладач: Л.В.Овер'янова

Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування

## ВСТУП

Залізниці України споживають більше 5% електроенергії та 10-15% дизельного палива. Тому основною метою енергетичної стратегії «Укрзалізниці» є економія паливно-енергетичних ресурсів при забезпеченні перевезень з урахуванням зростання економіки країни. Одним з радикальних шляхів досягнення цієї мети є використання накопичувачів енергії, які, розділивши в часі процес отримання та споживання електричної енергії на тягу і допоміжні потреби, на думку фахівців, можуть заощадити до 30% енергоресурсів.

З існуючих типів накопичувачів енергії (літієво-іонні, суперконденсатори, маховики, надпровідні) на сьогоднішній день на реальних об'єктах працюють електромеханічні інерційні накопичувачі [1...3], для дослідження роботи яких необхідне залучення сучасного математичного апарату і високорозвинених засобів програмування.

В рамках курсової роботи студентам пропонується в програмному середовищі MATLAB вирішити систему диференціальних рівнянь, яка описує функціонування бортового електромеханічного інерційного накопичувача енергії у складі тягового електроприводу приміського електропоїзда в режимах гальмування і розгону.

Розглядається процес обміну енергією у тяговому електроприводі між електродвигунами та накопичувачем у режимі гальмування приміського електропоїзда. Процес описано системою диференціальних рівнянь, яку необхідно вирішити у середовищі MATLAB за допомоги стандартних вирішувачів ODE.

Задано параметри приміського електропоїзда, тягового електродвигуна, інерційного електромеханічного накопичувача енергії, а також початкові умови для інтегрування.

Шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь необхідно отримати залежності у функції часу: струму в електричному колі накопичувач - електродвигун, швидкості руху електропоїзда, частоти

обертання ротора накопичувача, а також енергетичні показники роботи системи.

### ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ ДЛЯ ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Параметр	Варіант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Маса моторного вагона, т	50	55	60	65	70	50	55	60	65	70
Маса причепного вагона, т	40	45	50	55	60	60	55	50	45	40
Конструкц. Швидкість, км/год	100	120	140	160	180	200	210	120	140	160
Енергія обміну накопичувача, МДж	5	6	5,5	6,5	7	8	7,5	8,5	5,5	6,5
Момент інерції накопичувача, Н*m	3	3,3	3,6	3,9	4,2	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7
Струм в системі початковий, А	700	720	740	760	780	800	820	840	800	820
Швидкість поїзда початкова км/год	40	45	40	45	40	45	40	45	40	45
Частота обертання накопичувача початкова, мин <sup>-1</sup>	500	600	700	800	900	500	600	700	800	900

## ВИХІДНІ ДАНІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У програмному середовищі MATLAB вирішити систему диференційних рівнянь, яка описує процес обміну енергією в тяговому електроприводі електропоїзду EP2T між двома тяговими електродвигунами постійного струму 1ДТ003 одного візка та одним бортовим електромеханічним накопичувачем енергії в режимі гальмування. Вважати, що при гальмуванні накопичувач приймає енергію сповільнення маси рухомого складу, що приходить на два тягових електродвигуна.

Параметри електропоїзду, тягового електродвигуна та накопичувача енергії наведені у таблицях 1.1, 1.2 та 1.3, відповідно.

Таблиця 1.1 – Параметри поїзда EP2T

Параметр	Значення
Система тягового електропостачання	=3 кВ
Осьова формула	2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub>
Довжина секції поїзда, м	39,2
Ширина вагона, м	3,5
Висота над РГР, м	4,3
Діаметр колеса, м	1,05
Кількість місць для сидіння у: секції	194
моторному вагоні	110
головному вагоні	84
Маса вагона: моторного, т	65,8
прицепний, т	51,3

Конструкційна швидкість, км/год	130
Прискорення, м/с <sup>2</sup>	0,72
Уповільнення, м/с <sup>2</sup>	0,8
Потужність на тягу, кВт	960
Кількість двигунів	4

Таблиця 1.2 – Параметри двигуна 1ДТ-003

Параметр	Значення
Потужність $P$ , кВт	235
Напруга $U_{ном}$ , В	750
Струм $I$ , А	345
Частота обертання $n$ , об/мин	1250
Маса $m$ , кг	2300
Момент на валу $M$ , Н·м	1700
Коефіцієнт корисної дії $\eta_{ted}$ , в.о.	0,905
Активний опір $R_a$ , Ом	0,14
Індуктивність $L_a$ , Гн	$1,52 \cdot 10^{-3}$
Машинна постійна $C_{md}$	102
Машинна постійна $C_{ed}$	10,7

Таблиця 1.3 – Параметри накопичувача

ПАРАМЕТРИ	
Габаритні розміри, м: D x H	0,6 x 0,47
Енергія обміну, МДж	5,2
Потужність, кВт	280
Напруга номінальна, В	700
Струм номінальний, А	400

МАХОВИК	
Матеріал	вуглепластик
Розміри, м: d внш. x d внутр. x h	0,45x0,22x0,34
Маса, кг	110
Момент інерції, кг • м <sup>2</sup>	3,5
Оберти, хв <sup>-1</sup> : max ... min	16550...500
ЯКІР	
Число полюсів	4
Полюсний поділ, м	0,168
Число фаз	4
Число котушок у фазі	4
Індуктивність, Гн	$3,05 \cdot 10^{-5}$
Активний опір, Ом	0,005
Машинна постійна $C_{en}$	0,182
Машинна постійна $C_{mn}$	1,75
ІНДУКТОР	
Магніт, м: L x H x W	0,16x0,23x0,015
матеріал	Nd-Fe-B
Індукція, Тл	0,2
Проміжок, м	0,003

Результати розрахунку процесу обміну енергією для режиму гальмування навести у вигляді графіків функцій

- струму в системі «накопичувач-тяговий електродвигун»  $i_d(t)$  ;
- швидкості електропоїзду  $v_{ps}(t)$ ;
- частоти обертання ротора накопичувача  $\omega_n(t)$  ;

- кінетична енергія руху рухомого складу  $W_d(t)$ ;
- кінетична енергія обертання ротора накопичувача  $W_n(t)$ ;

які представити на окремих графічних полотнах, а також проаналізувати фізичний перебіг процесів отриманих закономірностей.

## ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА РОБОТИ

### Схема і математична модель процесу обміну енергією

Структурна схема тягового електропривода з накопичувачем енергії для дослідження процесів обміну в режимі гальмування ЕРС [4] наведена на рис. 2.1.

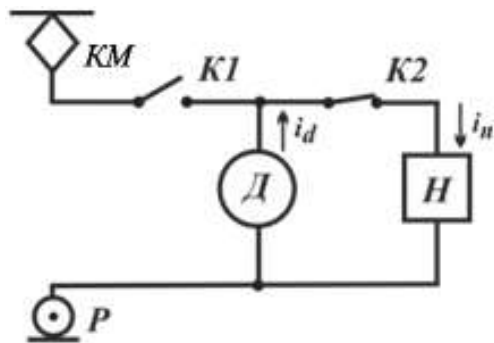


Рис. 2.1 – Структурна схема тягового електропривода з накопичувачем енергії: П – тяговий електричний двигун, Д – тяговий електричний двигун, К1, К2 – контактори, П – тяговий електричний двигун, Д – тяговий електричний двигун,  $i_d$ ,  $i_n$  – струми тягового електричного двигуна та накопичувача енергії

У режимі гальмування ЕРС тяговий електричний двигун працює як генератор, а накопичувач енергії працює як двигун. Енергія, що виділяється тяговим електричним двигуном, надходить на накопичувач енергії.

У режимі гальмування ЕРС тяговий електричний двигун працює як генератор, а накопичувач енергії працює як двигун.



$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{e_d - e_n - i_d(R_a + R_n)}{L_a + L_n}; \\ \frac{dv_{ps}}{dt} = -K_v \cdot \frac{e_d i_d}{v_{ps}} - f_w; \\ \frac{dw_n}{dt} = K_w \cdot i_d, \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $K_v = \frac{C_{md} \pi \eta_{ted} \eta_r}{C_{ed} 30 m_{ps}}$ ;  $K_w = \frac{C_{mn} B_{sr} \eta_n}{J}$  – електрофізичні коефіцієнти;  $R_a, L_a$  – активний опір і індуктивність ТЕД;  $e_d$  – електрорушійна сила (ЕРС) ТЕД;  $e_n$  – ЕРС накопичувача;  $i_d$  – струм в системі;  $m_{ps}$  – маса секції електропоїзда, припадає на еквівалентний ТЕД;  $v_{ps}$  – швидкість ЕРС;  $C_{ed}, C_{md}$  – машинні постійні ТЕД;  $f_w$  – питома сила опору руху;  $\eta_n, \eta_{ted}, \eta_r$  – КПД накопичувача, ТЕД, тягового приводу, відповідно;  $R_v, L_v$  – активне і індуктивний опір обмотки збудження ТЕД, відповідно.

Тягові електродвигуни постійного струму при гальмуванні ЕРС працюють в режимі генератора з незалежним збудженням.

Функцію ЕРС двигуна  $e_d = f_e(v_{ps}, i_v)$  задаємо в відповідності з дослідними даними (рис. 2.2) у вигляді одномірних масивів чисел  $Vps$  і  $Iv$  розміру  $1 \times 24$ , а також двомірного масиву  $Ed$  розміром  $24 \times 24$ .

Для обчислення довільного значення ЕРС двигуна  $e_d$  в довільній точці  $(v_{ps}, i_v)$  застосуємо інтерполяцію функції на основі дрібно-факторного досліджу  $2^{3-1}$  [8] по чотирьом точкам  $(Vps_i, Iv_j), (Vps_{i+1}, Iv_j), (Vps_i, Iv_{j+1}), (Vps_{i+1}, Iv_{j+1})$  на площині  $VpsO Iv$ , взятих із заданих масивів і оточуючих довільну точку  $(v_{ps}, i_v)$ :  $Vps_i \leq v_{ps} < Vps_{i+1}, Iv_j \leq i_v < Iv_{j+1}$ .

По масиву  $Edg$  визначимо відповідні значення функції:

$$z_1 = e_g(Vps_i, Iv_j) = Ed_{ij}, \quad z_2 = e_g(Vps_{i+1}, Iv_j) = Ed_{i+1,j},$$

$$z_3 = e_g(Vps_i, Iv_{j+1}) = Ed_{i,j+1}, \quad z_4 = e_g(Vps_{i+1}, Iv_{j+1}) = Ed_{i+1,j+1}.$$

Визначимо коефіцієнт рівняння регресії:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2$$

Для кодованих факторів:

$$a_0 = \frac{1}{4}(z_1 + z_2 + z_3 + z_4), \quad a_1 = \frac{1}{4}(-z_1 + z_2 - z_3 + z_4)$$

$$a_2 = \frac{1}{4}(-z_1 - z_2 + z_3 + z_4), \quad a_3 = \frac{1}{4}(z_1 - z_2 - z_3 + z_4).$$

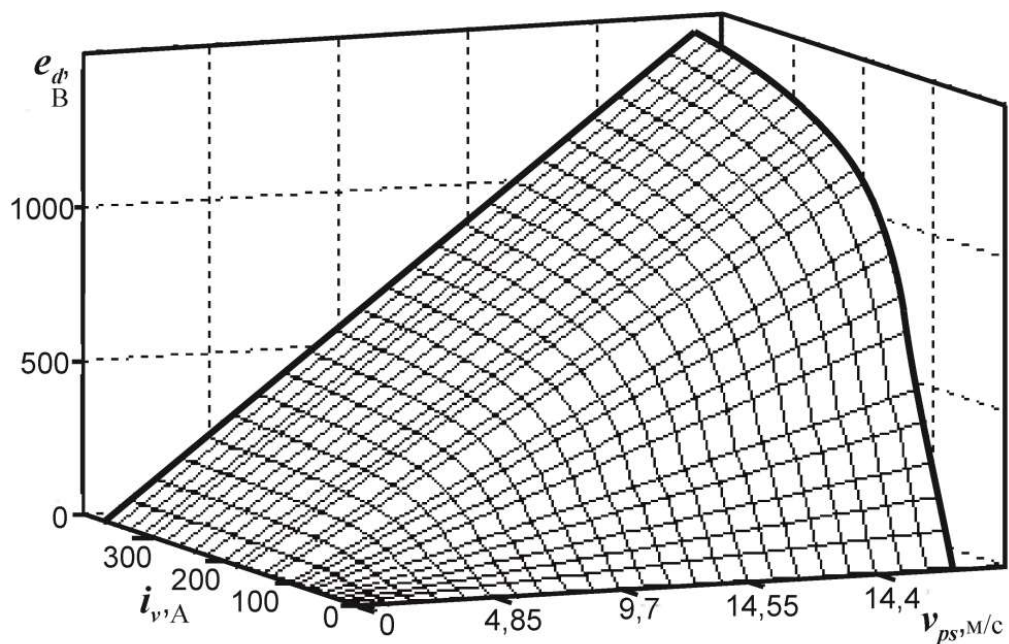


Рисунок 2.2 - Залежність ЕРС двигуна  $e_d$  від швидкості ЕПС  $v_{ps}$  і струму порушення  $i_v$

Підставляючи в рівняння регресії значення кодованих факторів

$$x_1 = \frac{v_{ps} - Vps_{cp}}{Vps_{cp} - Vps_i}, \quad x_2 = \frac{i_v - Iv_{cp}}{Iv_{cp} - Iv_j}$$

(тут  $Vps_{cp} = \frac{Vps_i + Vps_{i+1}}{2}$ ,  $Iv_{cp} = \frac{Iv_j - Iv_{j+1}}{2}$ ), отримаємо значення функції ЕРС

двигуна в генераторному режимі  $e_d = f_e(v_{ps}, i_v)$ .

Для визначення корисного ефекту від застосування бортового накопичувача в складі тягового електроприводу введемо показники оцінки властивостей роботи накопичувача.

Таким чином, наведені математичні моделі дають можливість визначити закономірності протікання процесів обміну енергією між тяговими двигунами і накопичувачем в режимах розгону і гальмування ЕПС.

## ВИРІШЕННЯ СИСТЕМИ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ РІВНЯНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Для вирішення системи диференційних рівнянь (2.1) складемо комплекс програм, які дозволяють дослідити процес обміну енергією в тяговому електропри

воді електропоїзду ЕР2Т між двома тяговими електродвигунами постійного струму 1ДТ003 одного візка та одним бортовим електромеханічним накопичувачем енергії в режимах гальмування та розгону.

Комплекс вміщує в себе чотири програми, створених як m-файли у програмі MATLAB: **mod03.m**, **proc03.m**, **dataEDS.m**, **interp.EDS**.

Файл-функція **mod03.m** – програма формування системи диференційних рівнянь (СДУ) (2.1) для режиму гальмування з керуванням струму збудження для методів інтегрування програмного середовища MATLAB.

Вхідні параметри – змінна часу  $t$  та вектор змінних станів, який включає змінну струму  $idg=x(1)$ , змінну швидкості руху електропоїзду  $vps=x(2)$  та змінну частоти обертання ротора накопичувача  $wnd=x(3)$ .

Вихідний параметр – вектор похідних змінних станів  $f$ , який включає в себе перші похідні струму  $didg$ , швидкості руху електропоїзду  $dvps$  та частоти обертання ротора накопичувача  $dwnd$ .

Лістинг програми наведено у Додатку А.

Файл-програма **proc03.m** представляє собою сценарій побудови процесів обміну енергією між накопичувачем та двигунами в тяговому електроприводі в режимі гальмування електропоїзду.

Файл-програма `proc03.m` звертається до файл-функції `mod03.m` з системою диференціальних рівнянь (2.1) та за допомоги вирішувача `ode23t`, який реалізує неявний метод трапецій, вирішує СДУ.

У програмі перелічуються постійні параметри та їх значення, вказуються постійні коефіцієнти  $K2$ ,  $K3$ ,  $KE$ , що входять до складу СДУ (2.1), та зазначається вектор початкових умов  $X0$ .

Результати розрахунку виводяться у вигляді графіків функцій на окремі графічні полотна з зазначенням координатних осей та назвою графіка.

Лістинг програми наведено у Додатку Б.

Також у програмі використовуються підпрограма **dataEDS.m**, в якій в залежності від вектора швидкості руху електропоїзда  $vps$ , вектора струму збудження ТЕД  $id$  задається масив значень ЕРС ТЕД  $edg$  так, що формується поверхня, зображена на рис. 2.2.

Лістинг програми наведено у Додатку В.

Для розрахунку довільного значення електрорушійної сили тягового електродвигуна застосовується інтерполяція функції на основі дрібно-факторного експерименту, що сформовано у вигляді програми **interpEDS.m**.

Вхідними параметрами є точка інтерполяції з координатами  $(x,y)$ . Вихідний параметр – значення функції в точці інтерполяції.

Лістинг підпрограм наведено у Додатку Г.

## РЕЗУЛЬТАТИ ВИРІШЕННЯ СИСТЕМИ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ РІВНЯНЬ

Для вирішення системи диференційних рівнянь (2.1) у таблиці 3.1. наведено початкові умови для чисельного розрахунку: вказано початкові значення струму  $i_d$ , швидкості руху  $v_{ps}$  та частоти обертання ротора накопичувача  $w_n$ .

Таблиця 3.1 – Початкові умови для чисельного моделювання (в залежності від номеру варіанта)

Параметри	Значення
$i_d, A$	875
$v_{ps}, m/c$	12,5
$w_n, 1/c.$	52,4

Результати вирішення системи диференційних рівнянь (2.1), яка описує процес обміну енергією між накопичувачем і тяговими двигунами в режимі гальмуванні електропоїзду, представлено у вигляді графіків функцій струму в системі «накопичувач-тяговий електродвигун»  $i_d(t)$ , швидкості електропоїзду  $v_{ps}(t)$ , частоти обертання ротора накопичувача  $w_n(t)$ , кінетичної енергії руху електрорухомого складу  $W_n(t)$ , кінетичної енергії обертання ротора накопичувача  $W_{ps}(t)$ .

Встановлено, що при русі електропоїзду в режимі гальмування швидкість знижується за 12 с від значення 12,5 м/с до 7,5 м/с, а частота

обертання накопичувача зростає від  $52 \text{ c}^{-1}$  до  $1240 \text{ c}^{-1}$ , і далі ці показники змінювалися не суттєво.

Струм у системі підтримувався на позначці  $1000 \text{ A}$ , а після закінчення  $12 \text{ c}$  різко знизився до нуля.

Відносно енергетичних складових встановлено, що в початковий момент гальмування ЕРС мав енергію  $5,46 \text{ МДж}$ , а в кінцевий –  $1,85 \text{ МДж}$ . При цьому накопичувач почав заощаджувати енергію з відмітки  $4,8 \text{ кДж}$ , що відповідає енергії «мертвого об'єму», і на  $20 \text{ c}$  його енергія досягла значення  $2,5 \text{ МДж}$ .

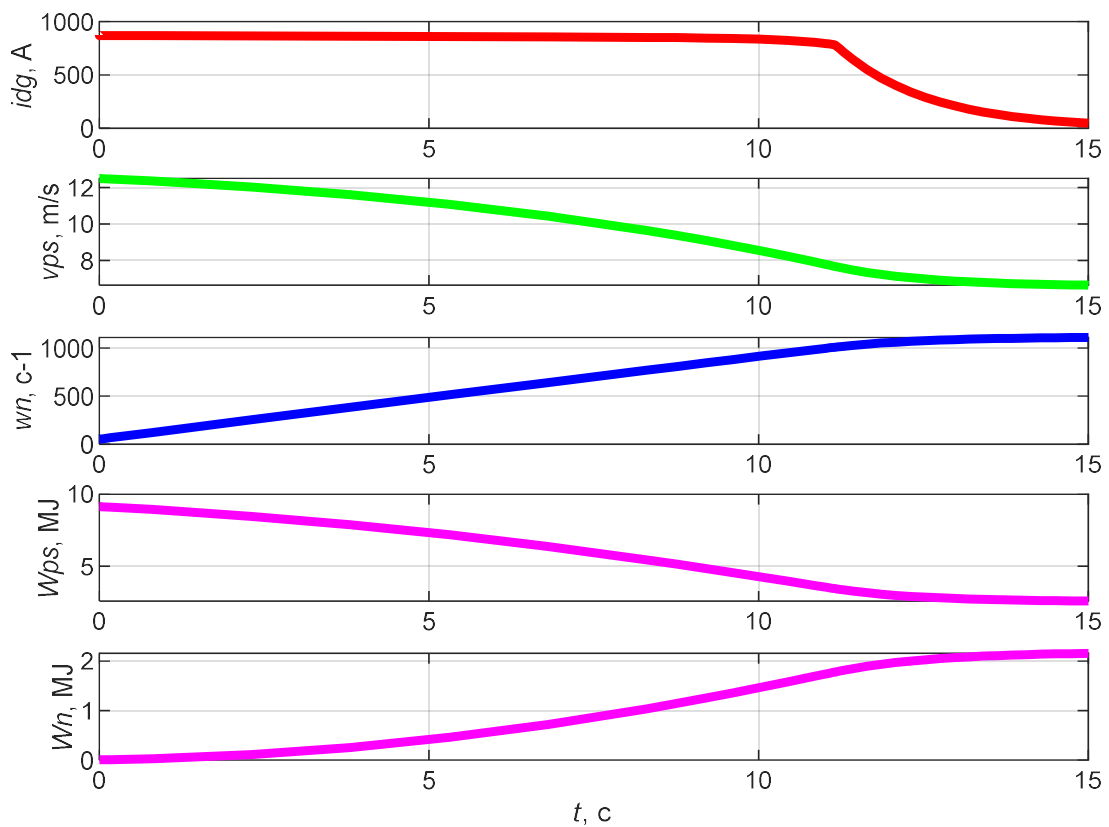


Рис.3.1 – Результати вирішення СДУ (2.1) в режимі гальмування поїзду

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Konishi T. Energy Storage System for DC Electrified Railway Using EDLC / T. Konishi, Y. Nakamichi // QR of RTRI. – May. 2004. – Vol. 45, No. 2. – P. 53–58.
2. Sameshima H.. On-board Characteristics of Rechargeable Lithium Ion Batteries for Improving Energy Regenerative Efficiency / Hiroshi Sameshima, Masamichi Ogasa, Takamitsu Yamomoto // QR of RTRI. – 2004. – Vol. 45, No. 2. – P. 45–52.
3. Стационарні накопичувачі енергії на метрополітені Гамбурга // Залізниці світу. – 2010. – № 7. – С. 60–64.
4. Омеляненко В.І. Робота бортового електромеханічного інерційного накопичувача енергії у тяговому приводі приміського електропоїзда / В.І. Омеляненко, Л.В. Овер'янова // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 1. – С. 44–49.
5. Овер'янова Л.В. Визначення параметрів та оцінка властивостей електромеханічних інерційних накопичувачів енергії для приміських електропоїздів: дис. ... канд. тех. Наук: 05.22.09 / Овер'янова Лілія Вікторівна. – Харків, 2013. – 169 с.
6. Плаксін Ю.М. Математичні методи планування експерименту. / Ю.М. Плаксін. - ДеЛі, 2007, – 296 с.