

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

Оптимізація роботи електропривода електровоза ЕКр-1

Керівник: к.т.н., доц. Богачук В. В.

Доповідач: ст. гр. ЕТЗ-18м Шалагай Д. О.

Об'єктом дослідження магістерської дипломної роботи є процеси, що протікають у електротехнічному комплексі електровоза ЕКр1 при різних системах керування.

Предметом дослідження дипломної роботи є характеристики та режими роботи електропривода електровоза ЕКр1 при різних системах керування.

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є оптимізація системи електропривода електровоза ЕКр-1 з ціллю адаптації до мережі живлення 3 кВ постійного струму.

Задачі дослідження – розрахунок та вибір тягового електродвигуна, аналіз за результатами техніко-економічного обґрунтування та вибрати систему керування електроприводом, розрахунок системи електропривода, побудову навантажувальної діаграми, розрахунок та вибір елементів перетворювального агрегату, розробку системи керування, побудова математичної моделі САЕП та розрахунок динамічних режимів САЕП.

Актуальність роботи полягає в необхідності модернізації тягового електричного двигуна з ціллю застосування їх на вітчизняних електрорухомих складах. Данна необхідність обумовлена тим, що частина залізничної електричної мережі України тягових підстанцій – постійного струму 3 кВ, тому південна та східна частини країни потребує електрорухомі склади на двигунах постійного струму.

Наукова новизна полягає у принципово новому підході, що стоїть в основі переобладнання та модернізації системи тягового електричного двигуна електровоза змінного на постійну напругу мережу живлення.

Характеристика ЕКр-1 «Тарпан»



ЕКр1 «Тарпан» (Електропоїзд Крюківський перший) — швидкісний електропоїзд, створений на Крюківському вагонобудівному заводі 2011–2012 роках.



При підготовці до Чемпіонату Європи з футболу-2012 було придбано 10 швидкісних електропоїздів Hyundai Rotem (6 складів були доставлені до початку Чемпіонату, а ще 4 після його закінчення). У той же час на Крюківському заводі з власної ініціативи почали створювати швидкісний потяг з максимальною швидкістю 200–220 км/год. На той час поїзд лише проходив заводські випробування і обкатку. Станом на 31 січня 2013 року міжвідомча приймальна комісія Укрзалізниці прийняла до експлуатації перший поїзд ЕКр1-001 «Тарпан».

Порівняльна таблиця швидкісних електропоїздів

Країна-виробник, назва	Кількість вагонів в складі поїзда	Довжина рухомого складу, м	Загальна маса поїзда, т	Макс. шв., км/год	Кількість місць для сидіння	Ціна купівлі млн, грн	Ціна одного вагону, млн, грн
Південна корея (Hyundai або HRCS2)	9	200	480	160	579	380	42,2
Чеська республіка (Skoda або EJ 675)	6	160	380	160	607	250(по курсу 2011 року)	41,6
Україна (Екр-1)	9	230	560	160	609	200	22,1
Україна (Екр-1м)						225	25

Технічні характеристики

Рід струму — змінний 25 кВ 50 Гц, постійний 3кВ;

Ширина колії — 1520 мм;

Конструктивна швидкість — 160 або 200 км/год (в залежності від модифікації);

Загальна довжина 9-ти – вагонів електропоїзда: 230,0 м;

Ширина: 3,420 м;

Висота вагона: 4,4 м;

Матеріал обшивки кузова: нержавіюча сталь;

Тип тягового двигуна: асинхронний;

Термін служби вагонів: 50 років;

Кількість місць для сидіння: 609;

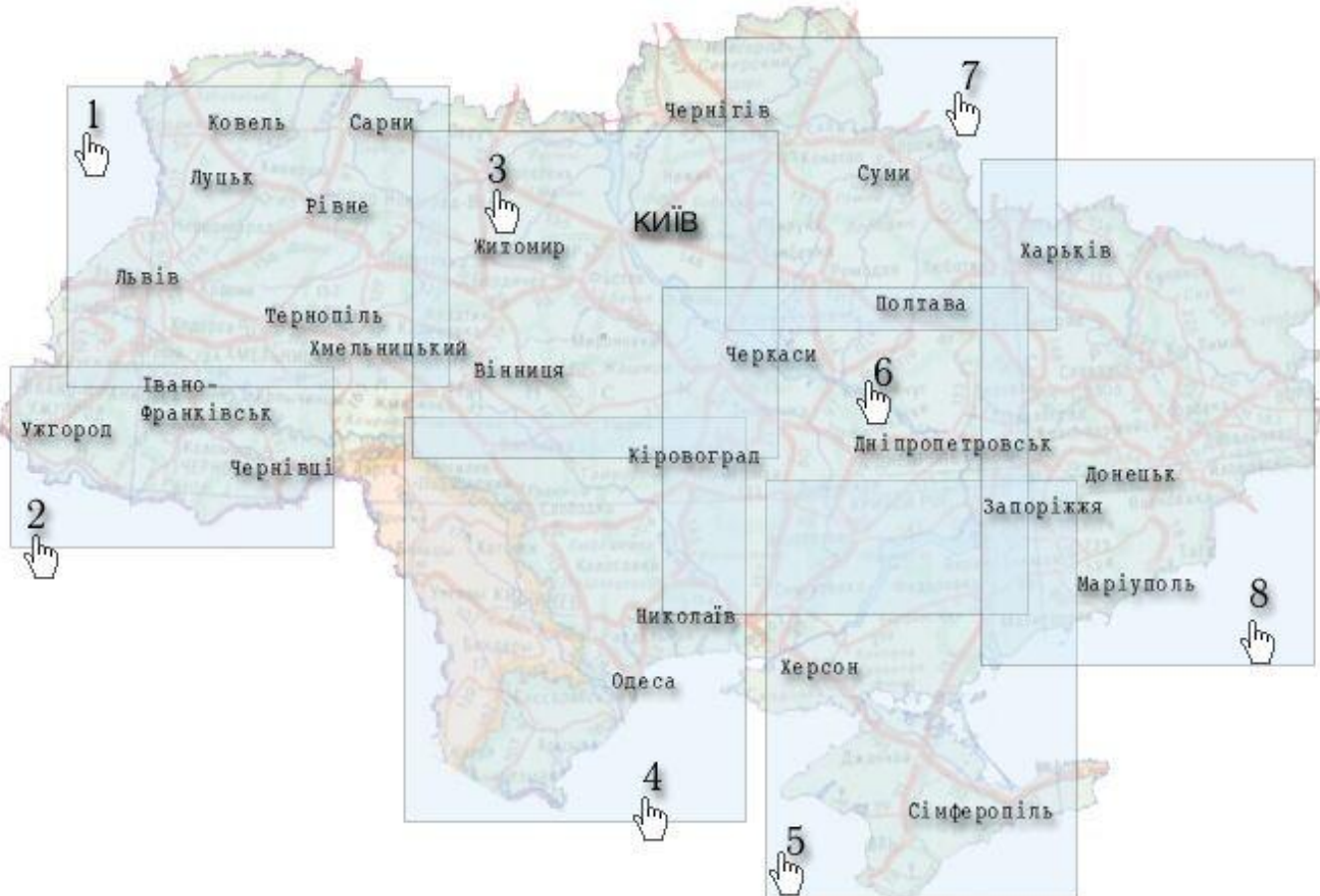
місць першого класу: 125;

місць другого класу: 370;

місць третього класу: 112;

місць для пасажирів в інвалідних візках: 2;

Максимальний термін проходження до першого обслуговування, роки: 24.



1. Львівська залізниця: Львів, Тернопіль, Рівне, Луцьк (Хмельницький, Житомир, Вінниця).
2. Львівська залізниця: Чоп, Ужгород, Івано-Франківськ, Чернівці.
3. Південно-Західна залізниця: Київ, Житомир, Вінниця, (Черкаси, Кропивницький (Кіровоград))
4. Одеська залізниця: Одеса, Кропивницький(Кіровоград), Миколаїв, Херсон + (Черкаси)
5. Придніпровська залізниця: Крим, Сімферопіль, Запоріжжя, Кривий Ріг, (Херсон)
6. Придніпровська залізниця: Дніпро (Дніпропетровськ), Запоріжжя, Кривий Ріг, (Полтава, Черкаси, Кропивницький (Кіровоград), Миколаїв, Херсон)
7. Південна залізниця: Полтава, Суми, Харків, (Чернігів)
8. Донецька залізниця: Донецьк, Луганськ, Маріуполь, (Харків)

Станом на 2017 рік, Укрзалізниця експлуатуються 193 електропоїзди постійного струму і 153 електропоїзди змінного струму. Загалом — 346 повноцінних складів електропоїздів.

На 01.01.2017 року розгорнута довжина контактної мережі склала 14408,5 км – на змінному струмі 25 кВ 50 Гц та 11052,8 км – на постійному струмі 3 кВ

Техніко-економічне обґрунтування вибору системи електропривода

Показники	Тип системи електропривода			
	ТП-ДПС	ШП- ДПС	ТРН-АД	ПЧ-АД
Розрахункове значення потужності двигуна P_n , кВт	585			
Вартість двигуна (Д), грн.	1012150	1012150	510548	510548
Вартість системи керування (СК), грн.	412185	382581	324174	405218
Капіталовкладення $K=D+СК$, грн	1524335	1444731	834722	915766
Амортизаційні відрахування, $C_a = E_a * K$, грн.	73216	71236	41736	45788
Витрати на обслуговування і ремонт, $C_o = E_o * K$, грн.	22865	21670	12520	13736
Кількість втраченої електро- енергії за рік, кВт	173901	173901	173901	173901
Витрати на електроенергію, грн	415153	415153	415153	415153
Собівартість $C = C_a + C_o + CDW$, грн.	514235	509061	469410	492458
Зведені витрати $Z = E_n * K + C$, грн.	773372	754665	611313	630358
Термін окупності $T = K/Z$, р.	1,731	1,714	1,365	1,453

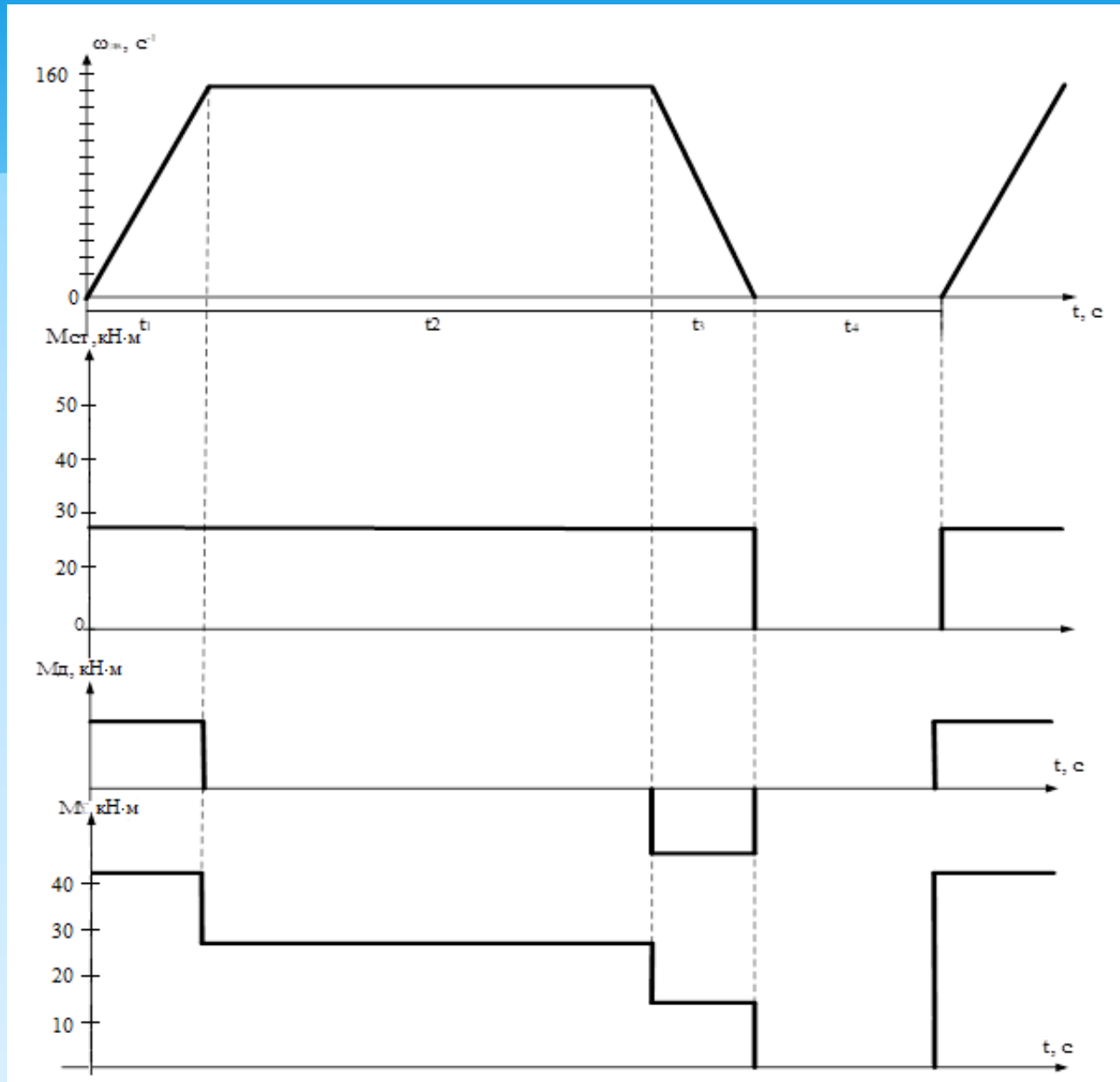
Вибір тягового електродвигуна

Приймаючи до уваги задану швидкість обертання і розраховану необхідну потужність, враховуючи економічні показники вибираємо тяговий асинхронний двигун – ТМФ 59-39-4, паспортні дані якого представлені в таблиці 1

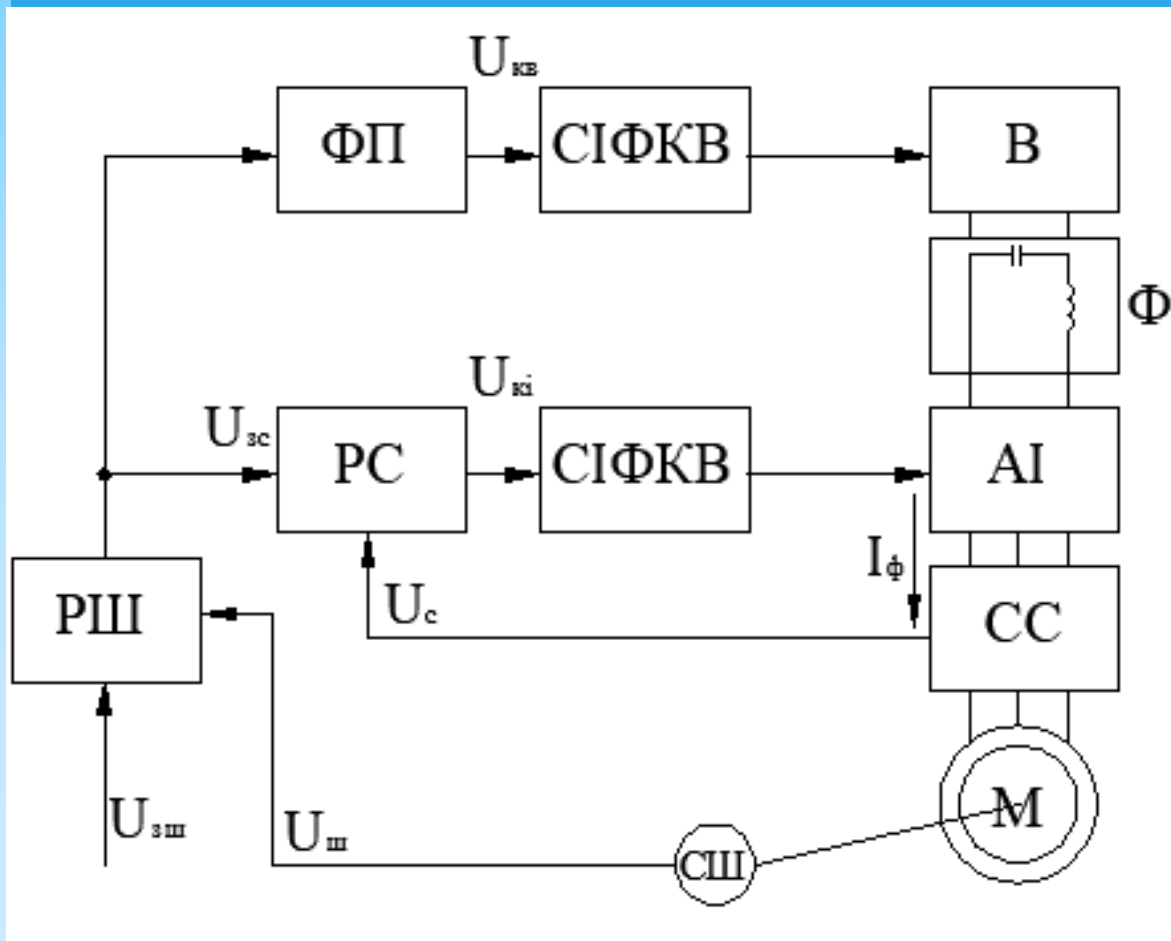
Таблиця 1 – Паспортні дані двигуна

Тип Двигуна	ТМФ 59-39-4
Номинально напруга, В	398
Потужність, кВт	600
Струм якоря в годинному режимі, А	885
Частота, Гц	57
Частота обертання, об/хв	1698
Максимальна частота обертання, об/хв	5125
Кількість полюсів	4
Клас ізоляції	200
Система ізоляції	VPI
Спосіб охолодження	Примусова вентиляція
Маса ТЕД, кг	1160
Попередження про перегрів статора, С	190
Відключення живлення при перегріві С	210

Тахограма та навантажувальна діаграма



Функціональна схема системи ПЧ-АД



ФП – функціональний перетворювач;
В – випрямляч;
Ф – фільтр;
АІ – автономний інвертор (АІ змінює частоту напруги як в двохзонному керуванні, також є безпосередні перетворювачі частоти які з трьох фазної синусоїдальної напруги, складає певну синусоїдальність, використовується в векторному керуванні ПЧ).

Математична модель системи ПЧ-АД

$$U_{zc} = R_{ш}(p) \cdot (U_{zш} - U_{ш}), \quad \beta = \frac{2 \cdot M_{\kappa}}{\omega_0 \cdot S_{\kappa}}, \quad K_{ш} = \frac{10}{\omega_0}, \quad K_c = \frac{10}{M_{\kappa}}$$

$$U_{\kappa i} = R_c(p) \cdot (U_{zc} - U_c),$$

$$f = \frac{k_{пч}}{T_{пч} \cdot p + 1} \cdot U_{\kappa} \cdot T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot S_{\kappa}}$$

$$K_{\text{сп}} = \frac{T_e}{2 \cdot T_{пч} \cdot k_c \cdot \frac{2\pi}{z_p} \cdot \beta}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{z_p} f, \quad \omega = \frac{1}{Jp} (M - M_c),$$

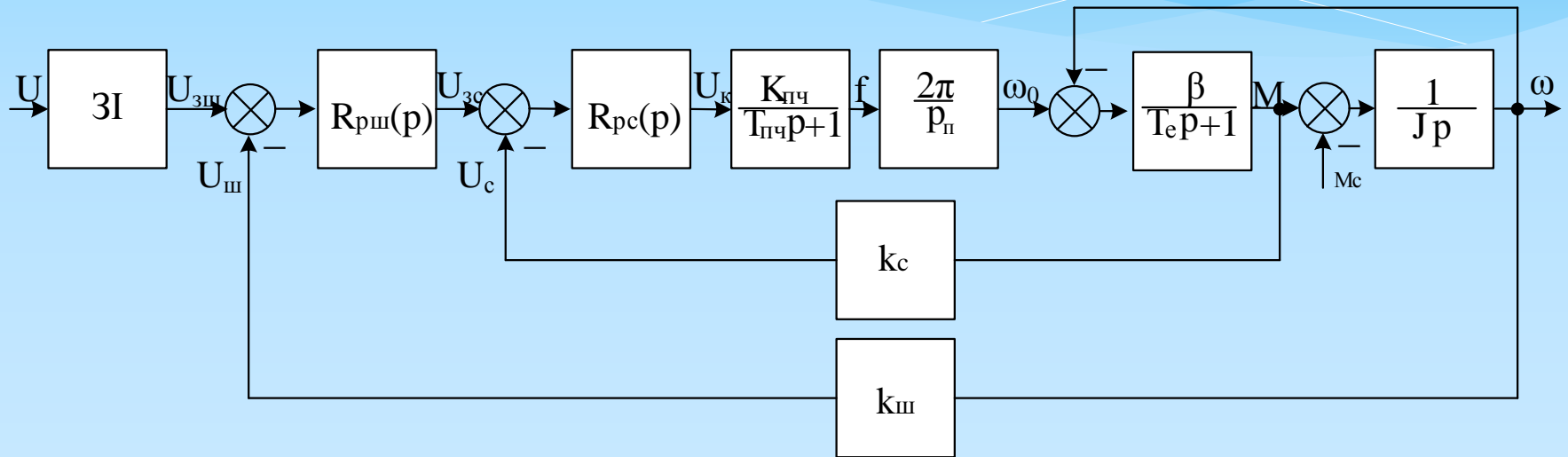
$$K_{\text{си}} = \frac{1}{2 \cdot T_{пч} \cdot k_c \cdot \frac{2\pi}{z_p} \cdot \beta}$$

$$M = \frac{\beta}{T_e + 1} (\omega - \omega_0), \quad U_{ш} = \frac{k_{ш}}{T_{ш} p + 1} \omega$$

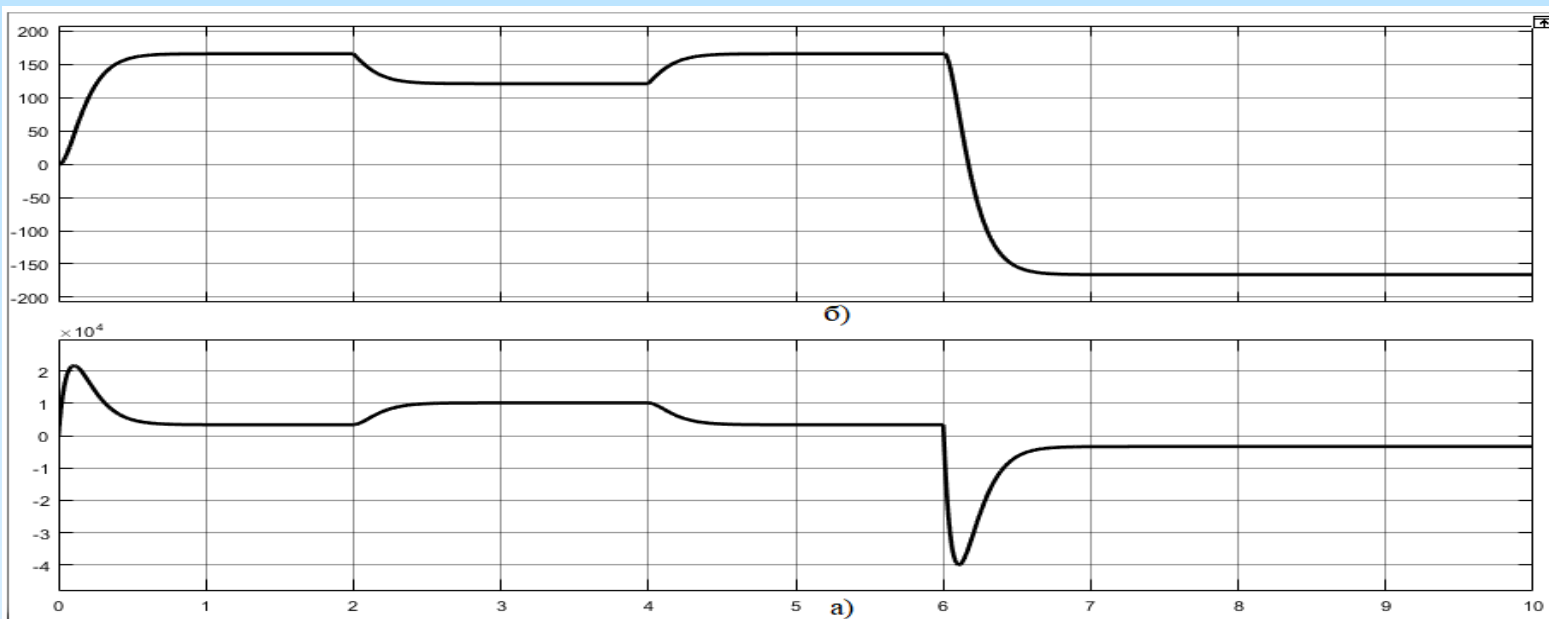
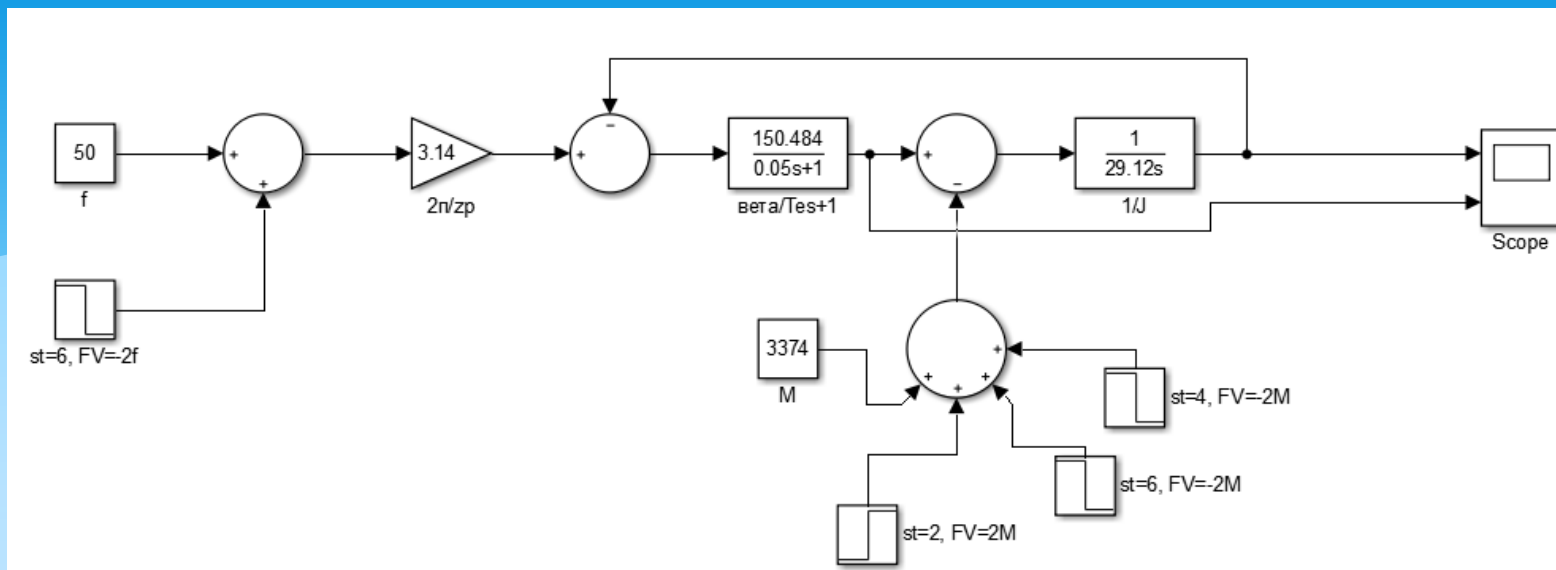
$$K_{\text{ши}} = \frac{1}{32 \cdot T_{пч}^2 \cdot 1/k_c \cdot \frac{1}{J} \cdot k_{ш}}$$

$$U_c = \frac{k_c}{T_c p + 1} \cdot I = \frac{k_c}{T_c p + 1} \cdot k_{\text{IM}} \cdot M = \frac{k_M}{T_c p + 1} \cdot M \cdot K_{\text{шп}} = \frac{8 \cdot T_{пч}}{32 \cdot T_{пч} \cdot 1/k_c \cdot \frac{1}{J} \cdot k_{ш}}$$

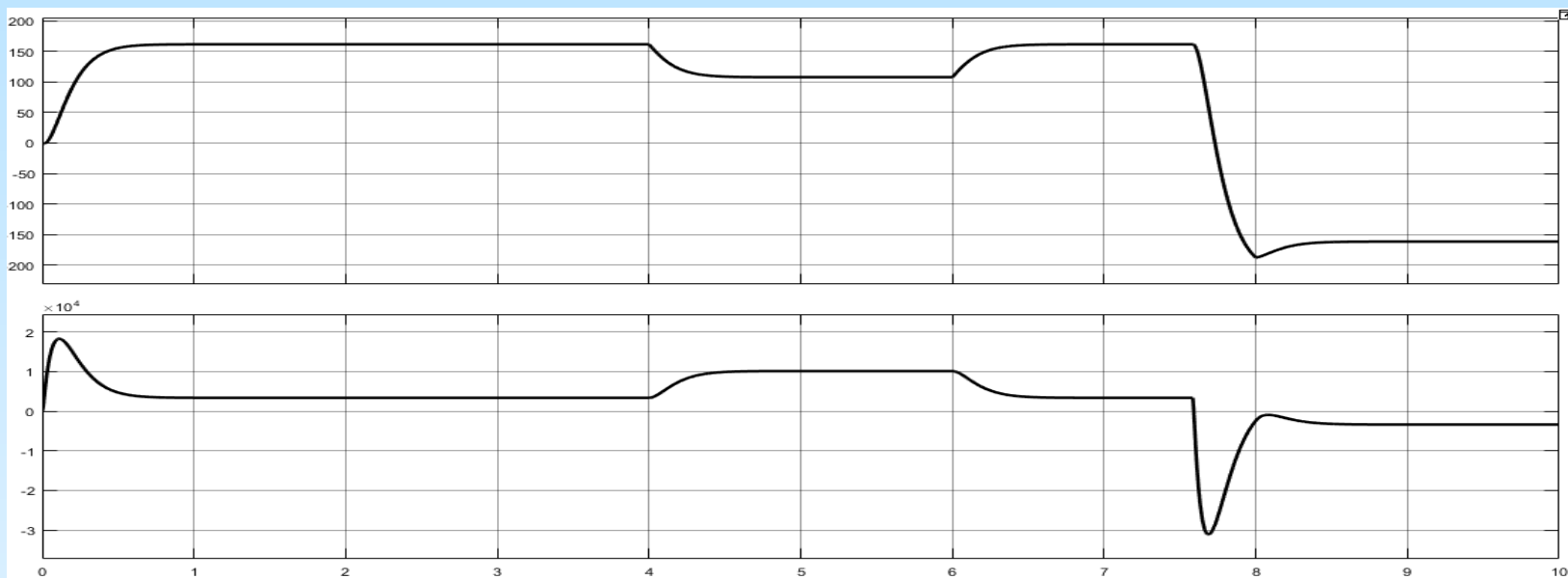
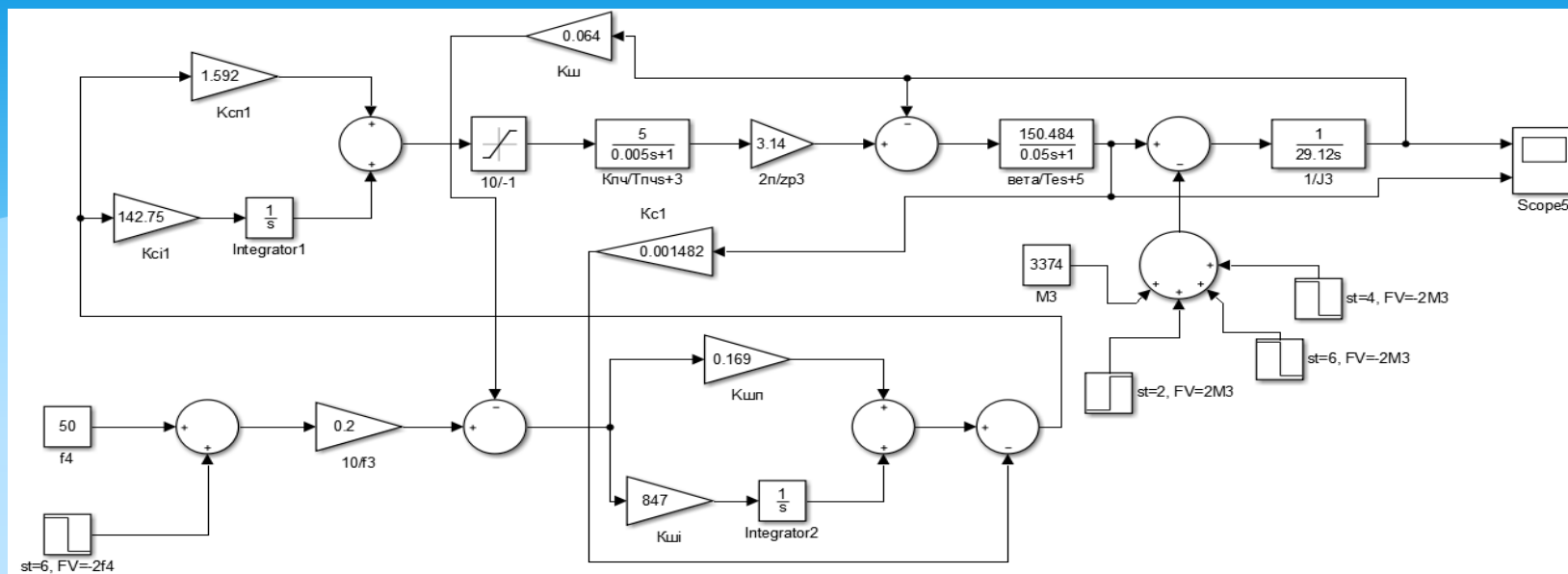
Структурна схема системи ПЧ-АД



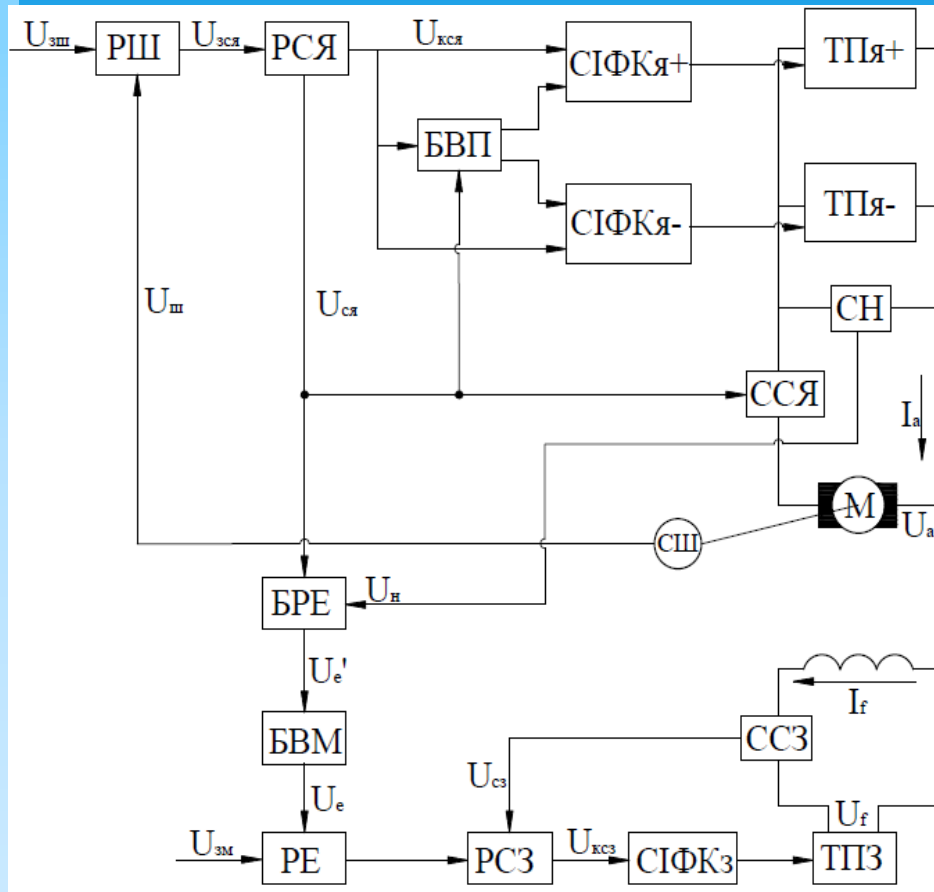
Математичне моделювання АД



Математичне моделювання системи ПЧ-АД



Функціональна схема системи ТП-Д



ТПя+, - – тиристорний перетворювач якоря двигуна;
РСЯ – регулятор струму якоря двигуна;
РШ – регулятор швидкості;
СІФКя+ – тиристорний перетворювач прямої полярності напруги якоря двигуна;
СІФКя- – тиристорний перетворювач зворотної полярності напруги якоря двигуна;
БВП – блок вибору полярності;
ССЯ – сенсор струму якоря двигуна;
СН – сенсор напруги якоря двигуна;
БРЕ – блок розрахунку ЕРС двигуна;
СШ – сенсор швидкості;
БВМ – блок виділення модуля числа(забезпечує математичну операції виділення модуля числа, а також для запобігання реверсу двигуна);
ССЗ – сенсор струму збудження;
РЕ – регулятор ЕРС;
РСЗ – регулятор струму збудження двигуна

Математична модель системи ТП-Д

$$U_{зся} = R_{ш}(p)(U_{зш} - U_{ш}), \quad U_{зсз} = R_{е}(p)(U_{зм} - U_{е}),$$

$$U_{кся} = R_{ся}(p)(U_{зся} - U_{ся}), \quad U_{кцз} = R_{цз}(p)(U_{зсз} - U_{цз}),$$

$$k\phi^* = \frac{k\phi}{k\phi_{н}} \Rightarrow k\phi = k\phi_{н}k\phi^*,$$

$$U_{а} = \frac{k_{тпя}}{T_{тпя}p + 1} U_{кся},$$

$$U_{\phi} = \frac{k_{тпз}}{T_{тпз}p + 1} U_{кцз},$$

$$I\phi^* = \frac{I\phi}{I\phi_{н}} \Rightarrow I\phi = I\phi_{н}I\phi^*,$$

$$U_{ш} = \frac{k_{ш}}{T_{ш}p + 1} \omega,$$

$$I_{\phi} = \frac{1/R_{\Sigma}}{T_{\phi}p + 1} U_{\phi},$$

$$k\phi^*(I_{\phi}^*) = B_1 \arctg(B_2 I_{\phi}^*),$$

$$U_{ся} = \frac{k_{ся}}{T_{ся}p + 1} I_{а},$$

$$U_{е} = \frac{k_{е}}{T_{е}p + 1} E_{а},$$

$$k\phi^* = A_1 + A_2 I_{\phi}^* + A_3 I_{\phi}^{*2} + A_4 I_{\phi}^{*3} + A_5 I_{\phi}^{*4}$$

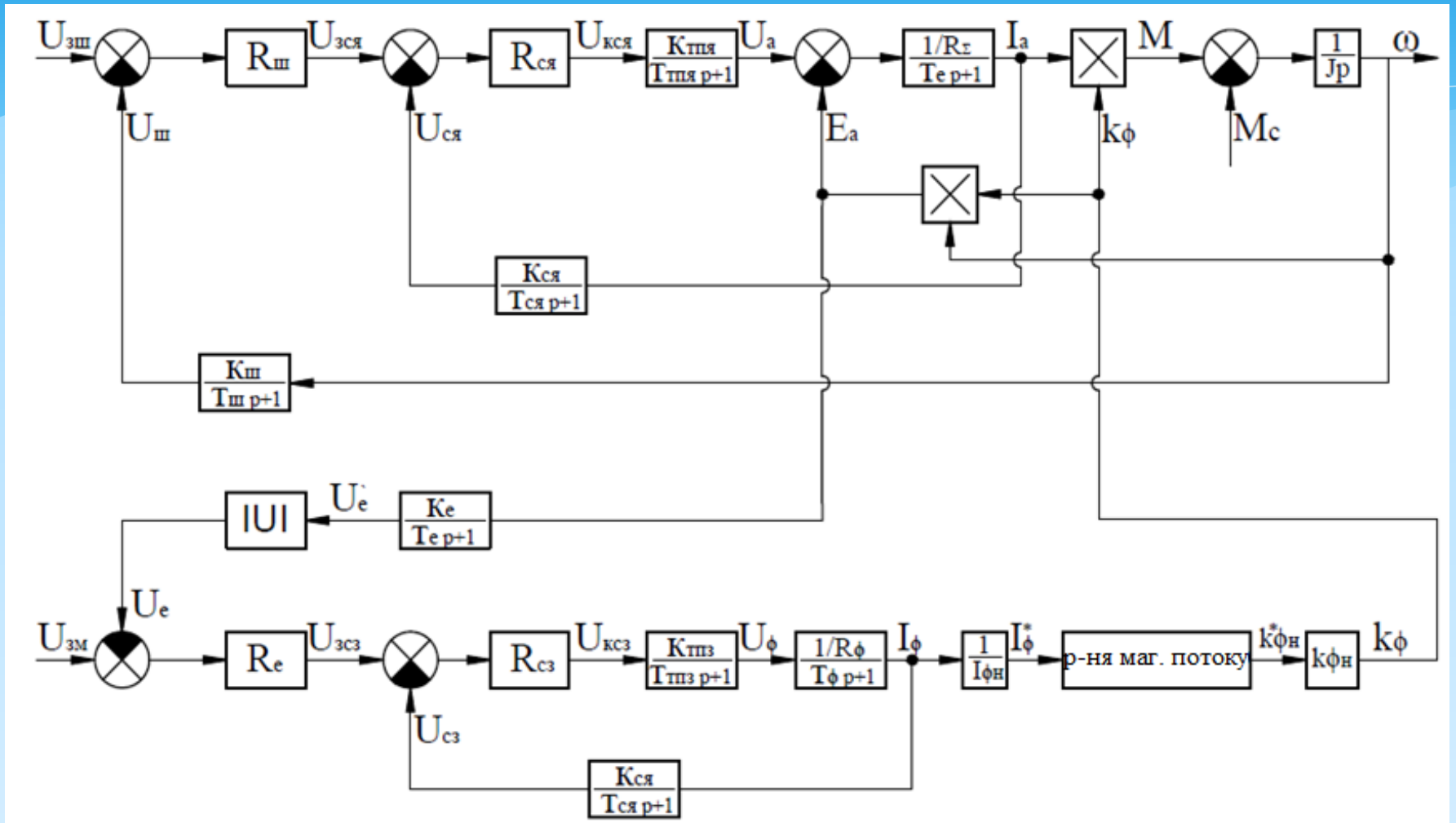
$$I_{а} = \frac{1/R_{\Sigma}}{T_{е}p + 1} (U_{а} - E_{а}),$$

$$U_{цз} = \frac{k_{цз}}{T_{цз}p + 1} I_{\phi},$$

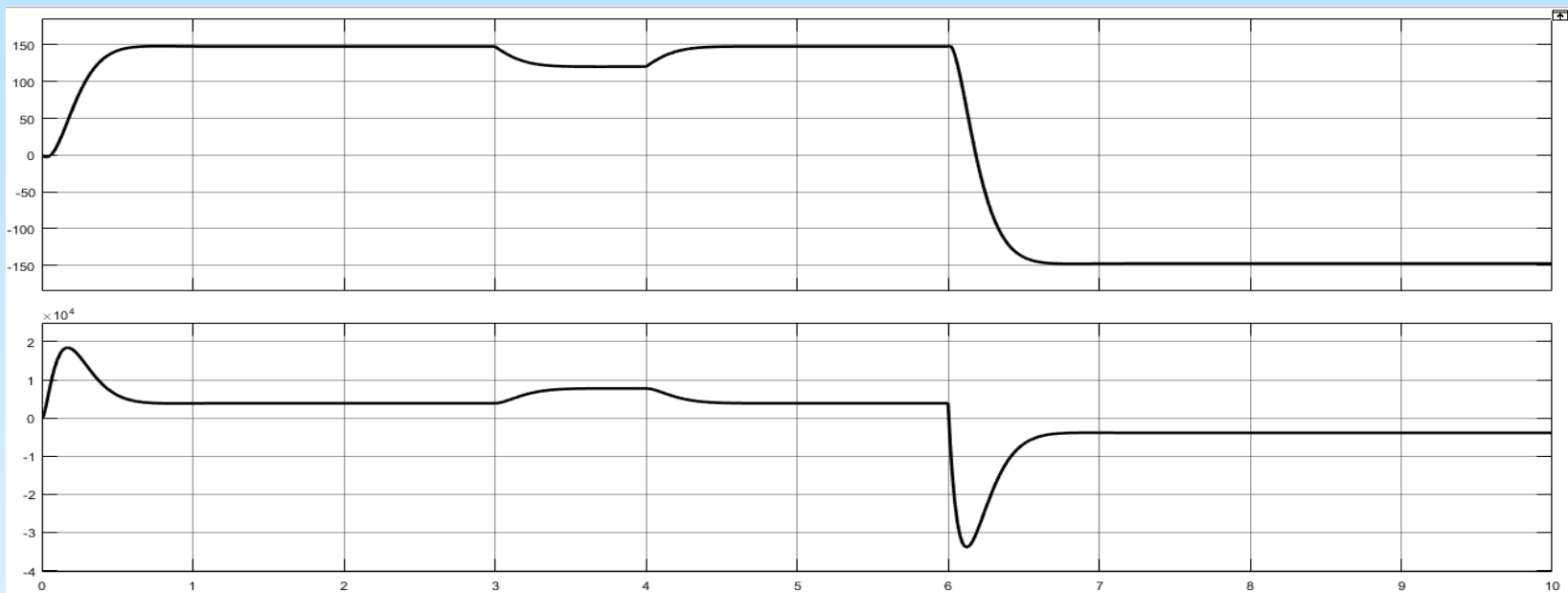
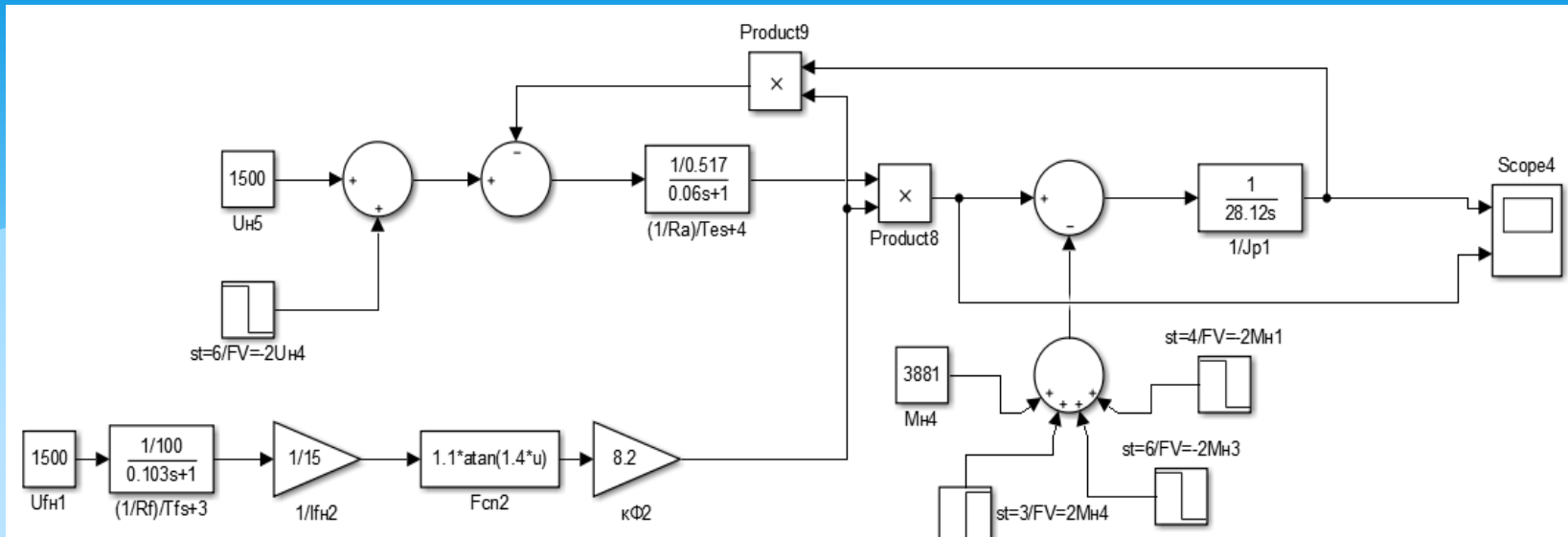
$$M = k\phi I_{а},$$

$$\omega = \frac{1}{Jp} (M - M_{с}),$$

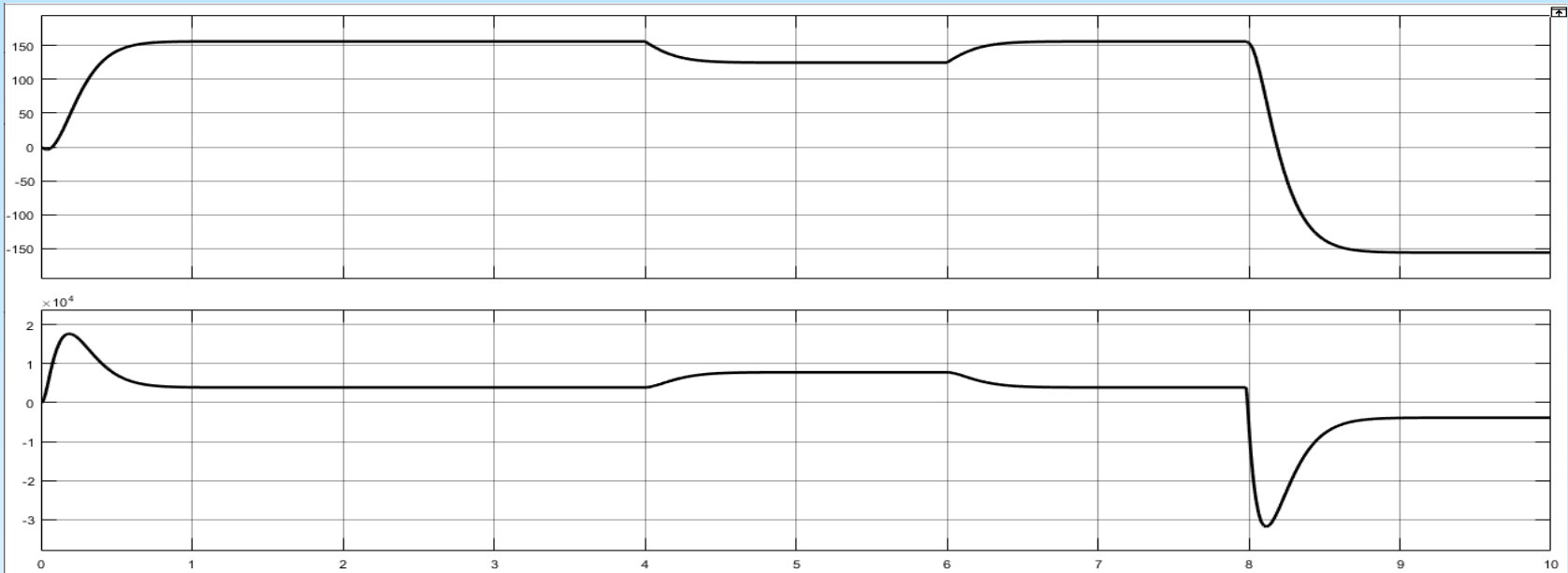
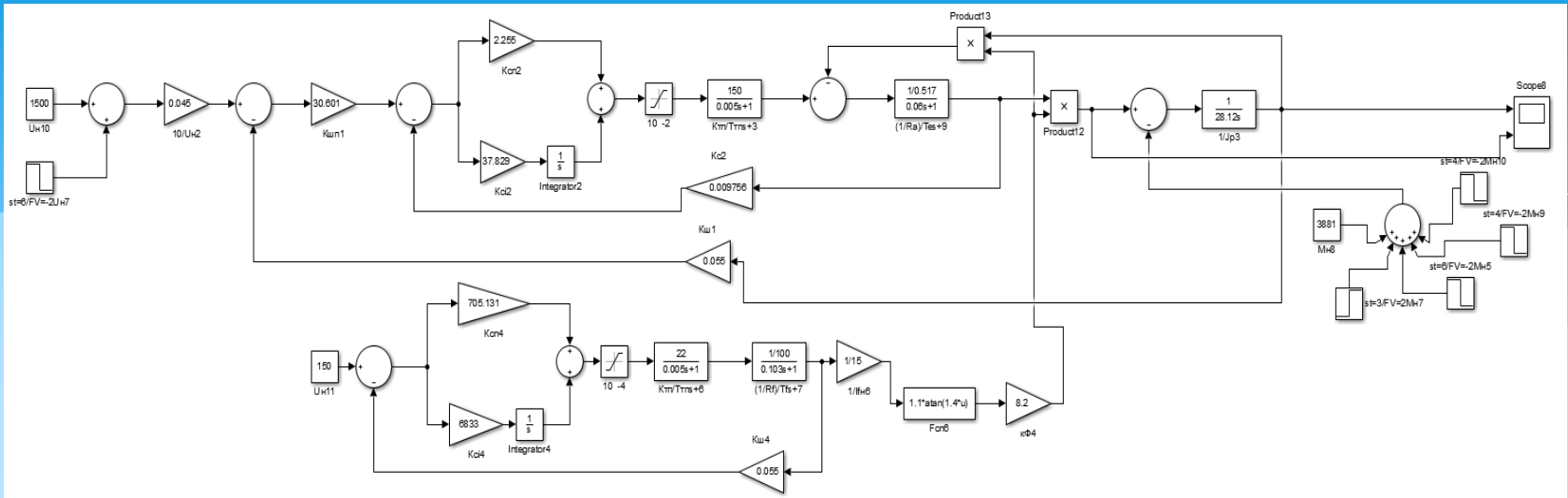
Структурна схема системи ТП-Д



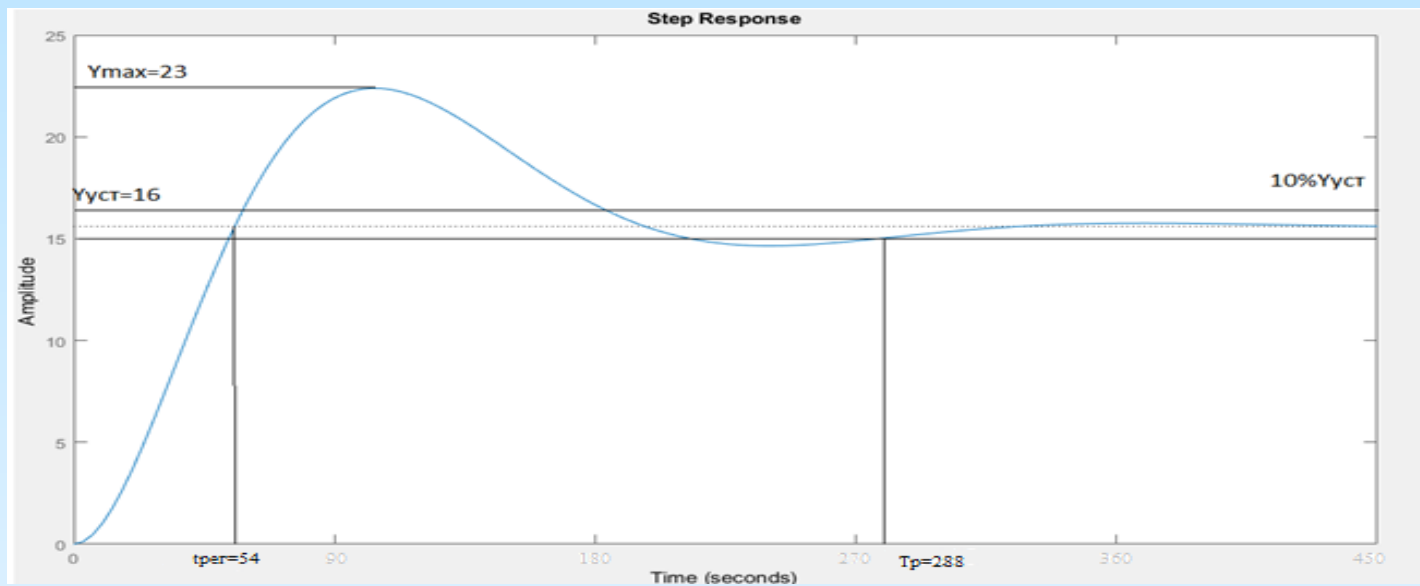
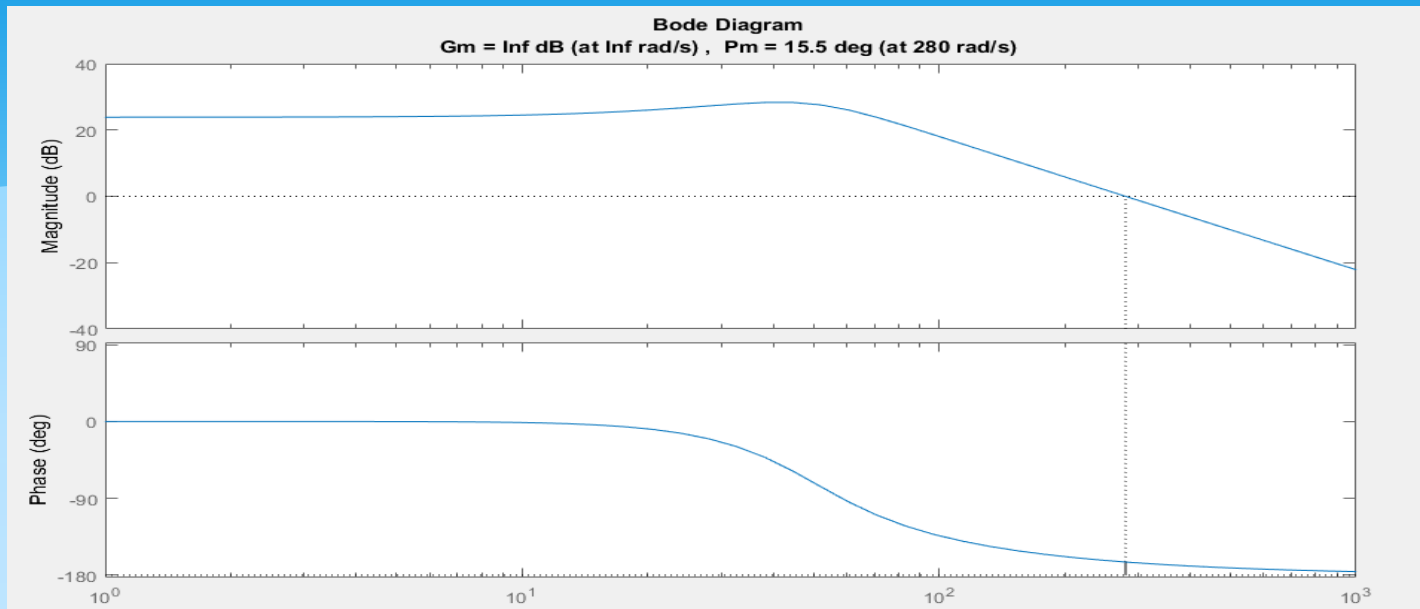
Математичне моделювання ДПС-НЗ



Математичне моделювання системи ТП-Д



Дослідження на стійкість та якість систем



Висновки

В результаті виконання магістерської дипломної роботи було оптимізовано роботу електропривода електровоза Екр-1 з ціллю адаптації до мережі 3 кВ постійного струму і виконано порівняння з системою на мережу живлення 25 кВ змінного струму. Обґрунтовано модернізацію тягового електропривода з ціллю застосування їх на вітчизняних електрорухомих складах, обумовлюючи це тим, що частина залізничної електричної мережі України тягових підстанцій – постійного струму 3 кВ, тому південна та східна частина країни потребують електрорухомі склади на двигунах постійного струму.

Застосовано принципово новий підхід, що стоїть в основі переобладнання та модернізації системи тягового електричного привода шляхом заміни двигуна змінного струму на двигун постійного струму. Також проведено моделювання систем ПЧ-АД з лінеаризованою моделлю асинхронного двигуна та ТП-Д з двохзонним регулюванням, яке забезпечує роботу двигуна в будь-якому режимі роботи, в результаті чого можна зробити висновок про аналогічність промодельованих системи з реальними процесами в електровозі. Дані моделі відповідають вимогам моделювання, а саме: модель проста і зрозуміла; цілеспрямована; гарантованого від абсурдних результатів; зручна в керуванні; повною з погляду розв'язання головних завдань, адаптивною, що дозволяє переходити до інших модифікацій або оновлювати дані, дозволяти поступові зміни. В результаті дослідження систем на стрійкість було проілюстровано годографи ЛАЧХ і ЛФЧХ, та на їх основі визначено стійкість системи.

Також було досліджено якість системи, та в результаті цього визначенно значення перерегулювання, яке дорівнює 43%, що говорить про високу швидкодійність обраних систем керування.

В роботі використовувалися математичні програми ППП “Matlab” та «Mathcad». Графічні матеріали виконувалися в Microsoft Visio.