

# ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЯ КТ4-СУ



Зовнішній вигляд трамвайного вагону Tatra KT4SU

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕТЗ-18м  
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка за освітньою програмою – Електричні  
системи і комплекси транспортних засобів

Адаменко Віктор Андрійович

Керівник к.т.н. Жуков О. А.

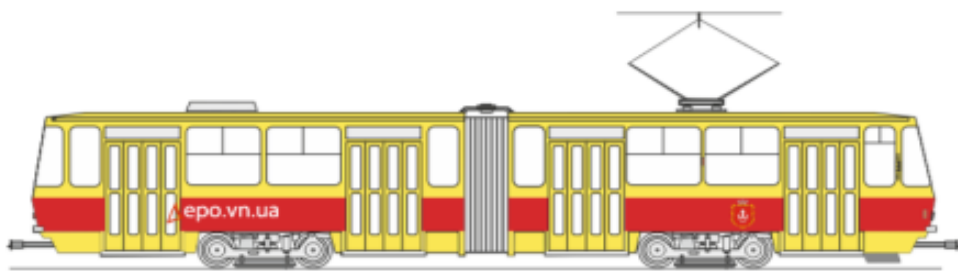
**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності роботи тягового електропривода трамвая за рахунок вибору кращої системи електропривода, що дозволить покращити динамічні показники та показники якості роботи електропривода.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих систем тягового електроприводу трамвая;
- 2) розрахувати параметри систем тягового електропривода трамвая;
- 3) розробити моделі тягових електроприводів трамвая;
- 4) розрахувати регулятори всіх тягових електроприводів трамвая;
- 4) промодельювати роботу різних електроприводів трамвая в однакових умовах навантаження і зробити висновки про ефективність роботи кожної з них. Обрати систему електропривода, яка буде найбільш ефективною.

**Об'єкт дослідження** – процес роботи тягового електропривода трамвая.

**Предмет дослідження** – різні системи тягового електропривода трамвая.



Будова трамвайного вагону Tatra KT4SU

Таблиця 1 – Технічні дані трамвайного вагону Tatra KT4S U

Назва параметру	Значення
Довжина кузова вагона	18 110 (мм)
Ширина кузова вагона	2 200 (мм)
Висота кузова вагона	3 110 (мм)
база вагона	8900 (мм)
Номинальна напруга контактної мережі	600 + 120 -200 (В)
Номинальна напруга допоміжних ланцюгів управління	24 (В)
Загальна потужність тягових двигунів	182 (кВт)
Маса порожнього вагону	20,3 (т)
Число сидячих місць для пасажирів	34
Кількість місць для стоячих пасажирів	141 (8 чол / м <sup>2</sup> )
Кількість візків	2
Ширина колії	1000 (мм)
База	1900 (мм)
Діаметр колеса	700 (мм)
Вантажопідйомність візка (max)	12500 (т)
Число тягових двигунів на один візок	2 шт
Постійна потужність тягових двигунів	45,5 (кВт)
Максимальна швидкість по прямій:	
- при передавальному числі 1: 7,43	65 (км / год)
- при передавальному числі 1: 8,77	55 (км / год)
Виробник	Прага (Чехія-Чехословаччина)

# Зовнішній вигляд та технічні данні



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд трамвайного вагону Tatra KT4SU

# Вибір системи електропривода

- Розглянемо такі варіанти електроприводів для тягового приводу трамвая КТ4СУ:
- 1. Існуюча релейно-контакторна система електроприводу з двигунами постійного струму послідовного збудження.
- 2. Транзисторна система електроприводу з двигунами послідовного збудження.
- 3. Транзисторна система електроприводу з двигунами змішаного збудження.
- 4. Частотно-інверторна система керування електроприводом з асинхронними двигунами.

Таблиця 2.1 – Параметри тягового двигуна ТЕ-022

Потужність, кВт	45
Номінальна напруга, В	300
ККД, %	91
Струм тривалого режиму роботи, А	150
Кількість обертів $n_{ном}$ , об/хв	1750
Кількість обертів $n_{max}$ , об/хв	4200
Опір обмотки якоря при 20°C, Ом	0,0545
Загальний опір двигуна при 20°C, Ом	0,1050
Опір додаткових полюсів при 20°C, Ом	0,0245
Момент інерції двигуна, кг·м <sup>2</sup>	0,577
Ціна, грн	147000

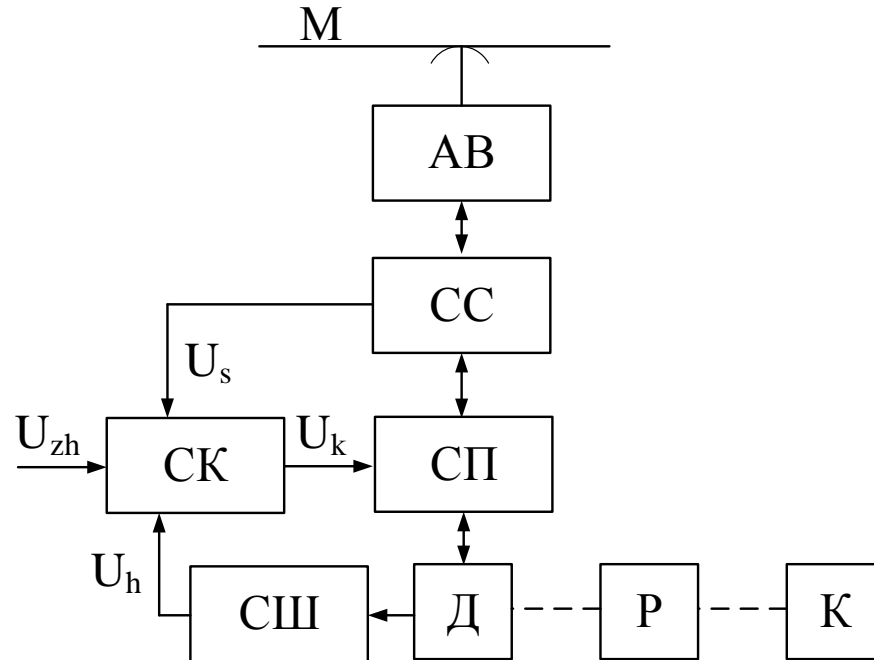
Таблиця 2.2 – Параметри тягового двигуна ДК259Г-3

Потужність, кВт	45
Номінальна напруга, В	550/275
ККД, %	90
Струм тривалого режиму роботи, А	190
Кількість обертів $n_{ном}$ , об/хв	1120
Кількість обертів $n_{max}$ , об/хв	4050
Опір обмотки якоря при 20°C, Ом	0,055
Опір обмотки послідовної при 20°C, Ом	0,0416
Опір обмотки паралельної при 20°C, Ом	47
Опір додаткових полюсів при 20°C, Ом	0,027
Момент інерції двигуна, кг·м <sup>2</sup>	1,127
Ціна, грн	161700

Таблиця 2.3 – Параметри тягового двигуна АТД-2

Потужність, кВт	54
Номінальна напруга (лінійна), В	345
Частота напруги живлення, Гц	60
ККД, %	92
Струм тривалого режиму роботи, А	118
Кількість обертів $n_{ном}$ , об/хв	1800
Кількість обертів $n_{max}$ , об/хв	4500
Номінальний момент на валу, Нм	287
Коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні	0,83
Режим роботи за ГОСТ 183-74	S2 (60 хв)
Номінальне ковзання	0,02
Момент інерції двигуна, кг·м <sup>2</sup>	0,146

# Структурна схема електропривода



Познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
М	Мережа живлення (тролея)	1	
АВ	Автоматичний вимикач	1	
СС	Сенсор струму	1	
СК	Система керування	1	
СП	Силвий перетворювач	1	
Д	Приводний двигун	1	
Р	Редуктор	1	
К	Колеса трамвая	1	
СШ	Сенсор швидкості	1	
		1	
		1	

Підпис і дата	
Інв. № дубл.	
Зам. інв. №	
Підпис і дата	
Інв. № ориг.	

08-16.МКР.001.00.000 Е1				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата.
Розробив	Адаменко В.			
Перевірив	Жуков О. А.			
Т. контр.				
Рецензент				
Н.контр.	Жуков О. А.			
Затв.	Кутін В. М.			

Підвищення ефективності тягового електропривода трамвая КТ4-СУ. Схеми електрична структурна одного тягового електропривода трамвая			Літера	Маса	Масштаб
			у		
			Аркуш	Аркушів	
			ВНТУ, ЕТЗ-18м		

# Математичні моделі приводних двигунів

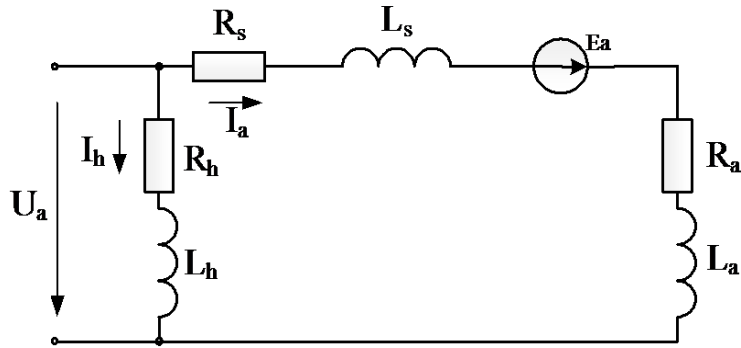


Схема заміщення ДПС 33

$$i_a(p) = \frac{1/R_{as}}{1 + T_c p} (u_a(p) - e_a(p))$$

$$i_h(p) = \frac{1/R_h}{1 + T_h p} U_a(p)$$

$$e_a(p) = kf(p) \cdot \omega(p)$$

$$kf(p) = kf_s(p) + kf_h(p)$$

$$kf_s^*(p) = A_1 \cdot \arctan(A_2 i_s^*(p))$$

$$kf_h^*(p) = B_1 \cdot \arctan(B_2 i_h^*(p))$$

$$m(p) = kf(p) \cdot i_a(p)$$

$$\omega(p) = \frac{1}{Jp} (m(p) - m_c(p))$$

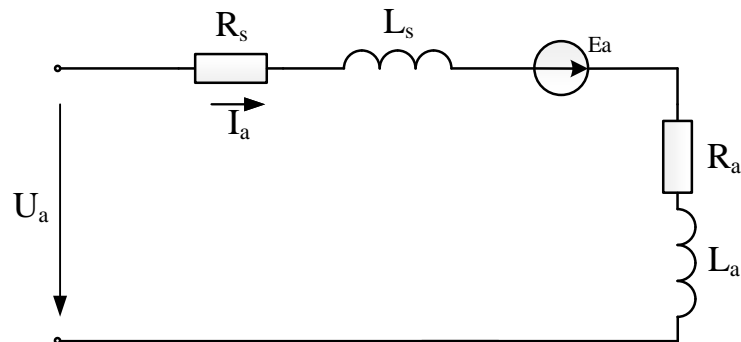


Схема заміщення ДПС ПЗ

$$i_a(p) = \frac{1/R_{as}}{1 + T_c p} (u_a(p) - e_a(p))$$

$$kf(p) = kf_s(p)$$

$$e_a(p) = kf(p) \cdot \omega(p)$$

$$kf_s^*(p) = A_1 \cdot \arctan(A_2 i_s^*(p))$$

$$m(p) = kf(p) \cdot i_a(p)$$

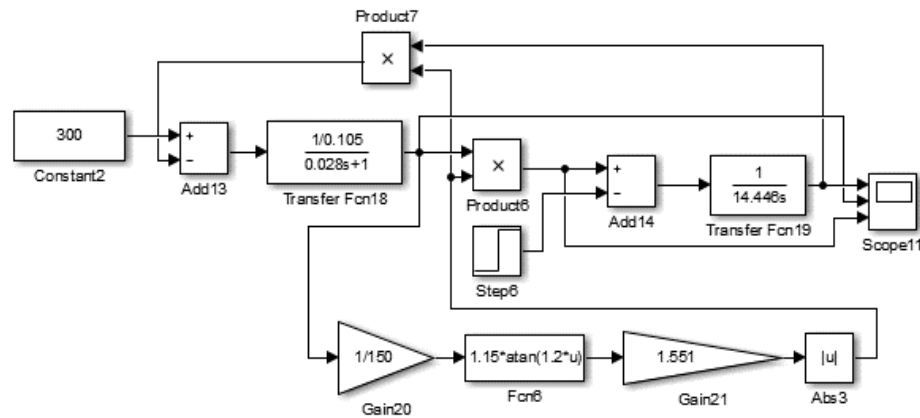
$$\omega(p) = \frac{1}{Jp} (m(p) - m_c(p))$$

$$M(s, \omega) = \frac{\beta}{T_c s + 1} (\omega_0 - \omega)$$

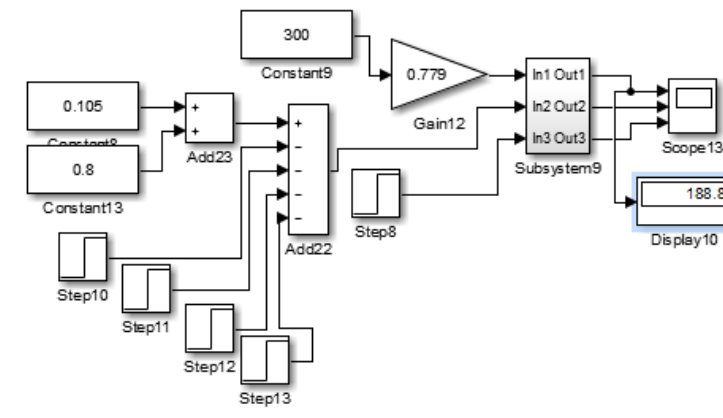
$$\omega_0(s) = k_1 \cdot f_1(s)$$

$$\omega(p) = \frac{1}{Jp} (m(p) - m_c(p))$$

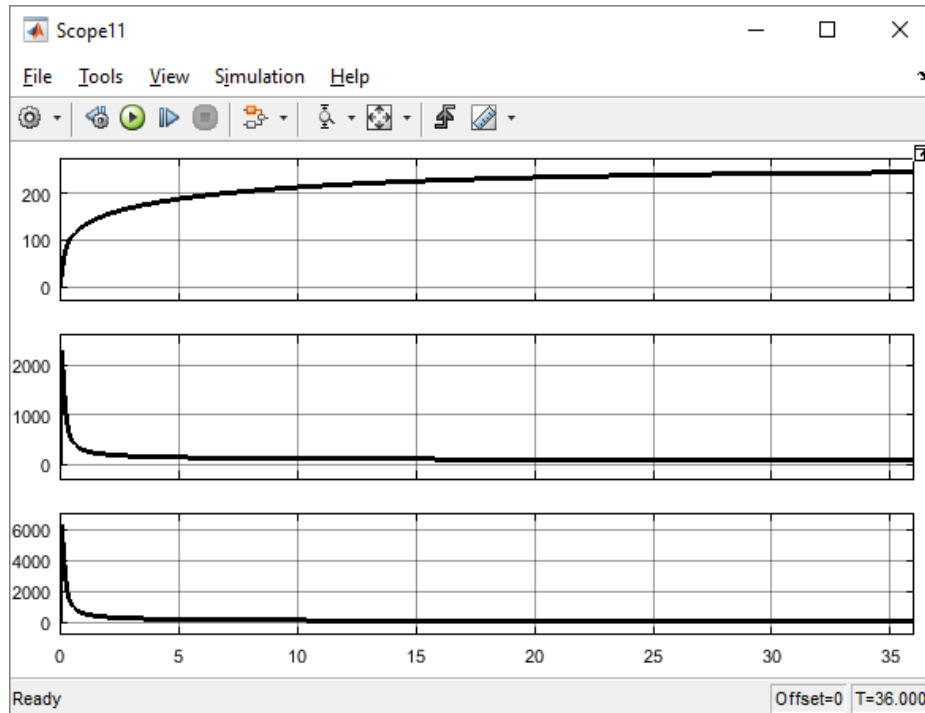
Лінеаризована модель АД



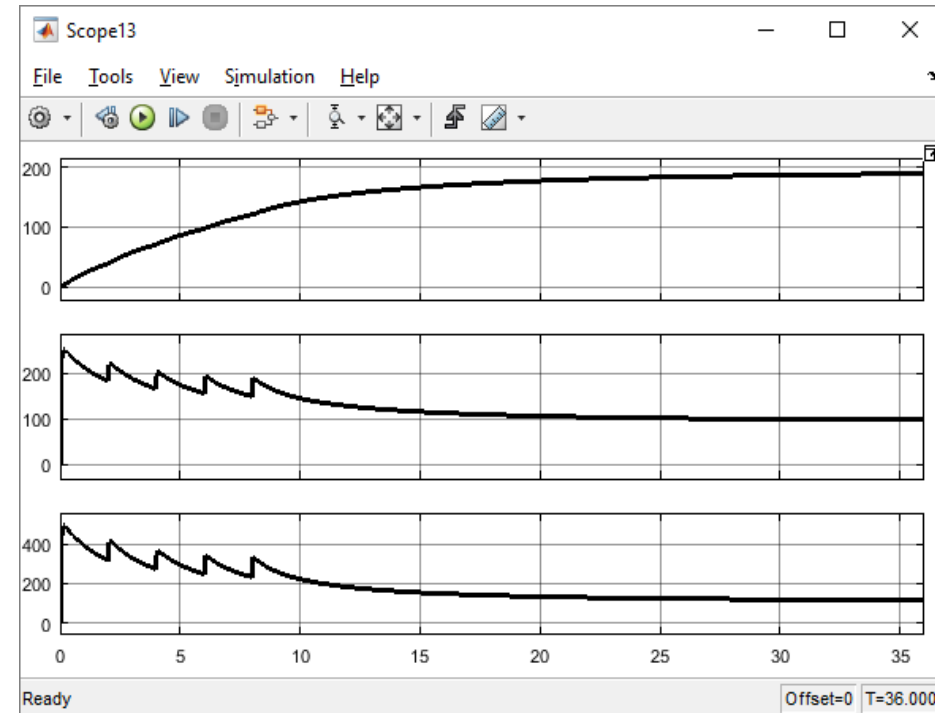
Комп'ютерна модель ДПСПЗ, зібрана в програмному середовищі Matlab



Комп'ютерна модель електропривода РКС-ДПСПЗ, зібрана в програмному середовищі Matlab



Результати моделювання прямого пуску двигуна на повне статичне навантаження

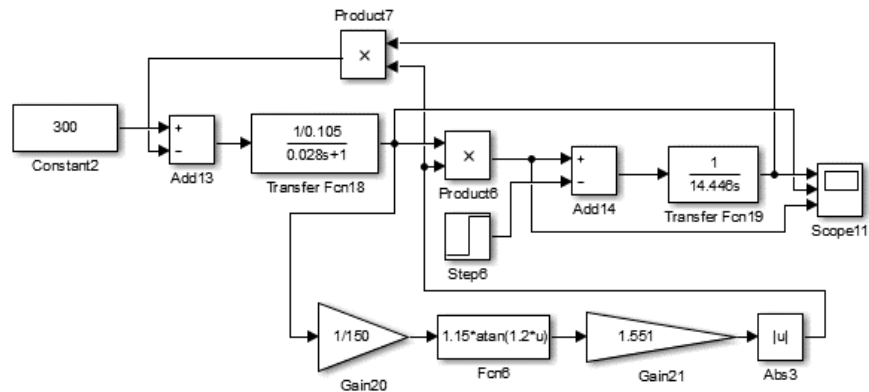


Результати моделювання реостатного пуску двигуна на повне статичне навантаження за чотири ступені

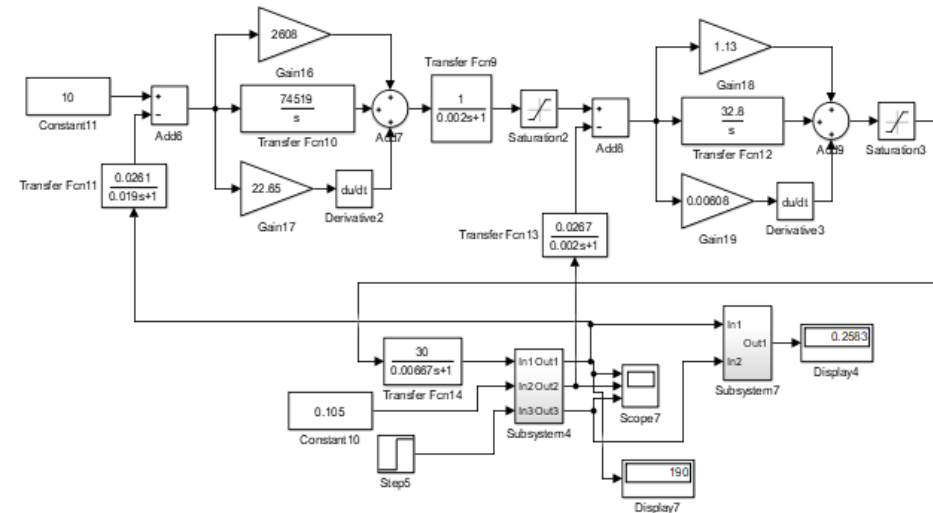
Швидкість  
обертання

Струм якоря

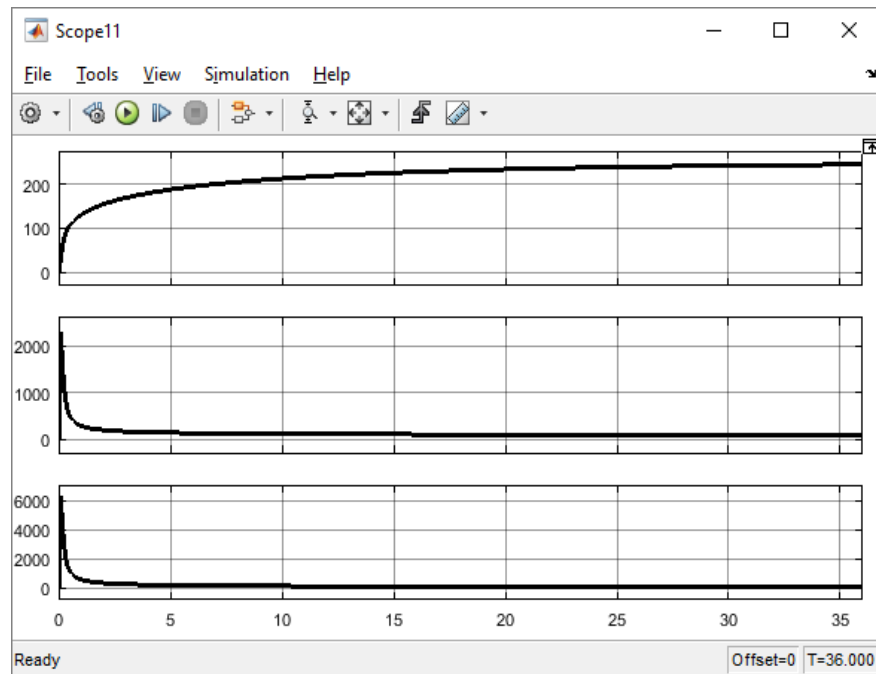
Момент  
двигуна



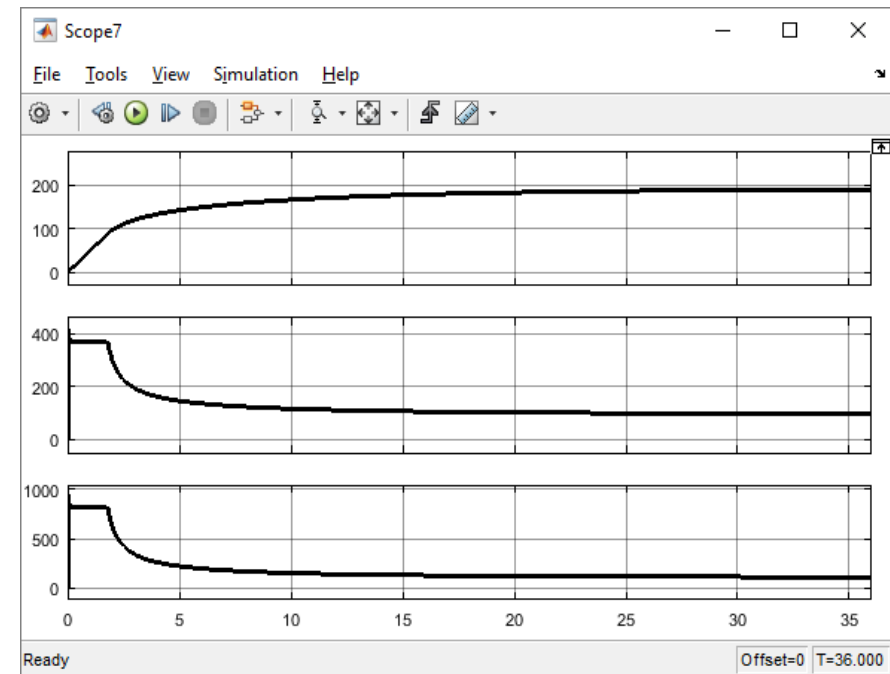
Комп'ютерна модель ДПСЗ, зібрана в програмному середовищі Matlab



Комп'ютерна модель електропривода ТІСК-ДПСЗ, зібрана в програмному середовищі Matlab

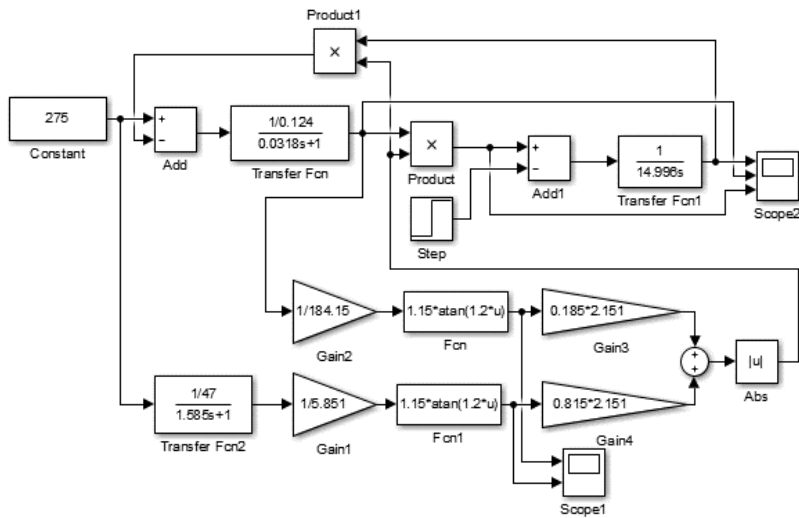


Результати моделювання прямого пуску двигуна на повне статичне навантаження

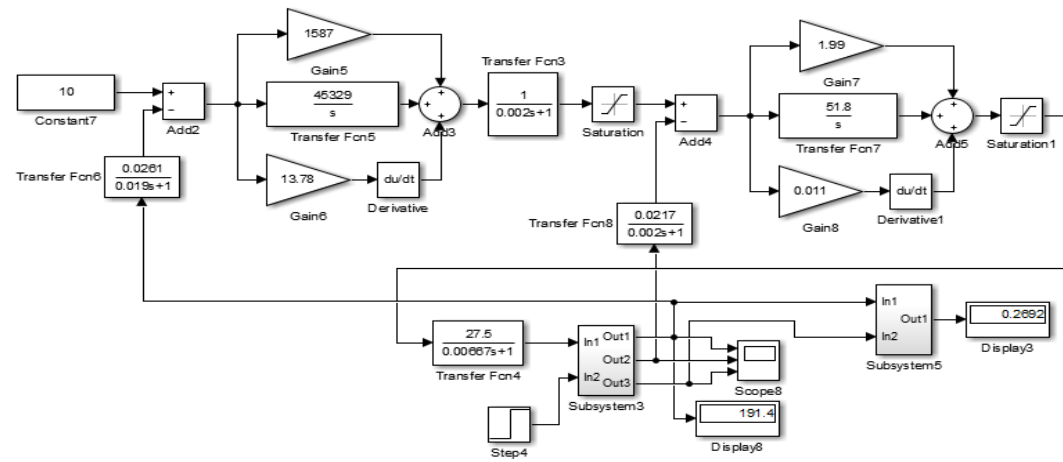


Результати моделювання пуску електропривода ТІСК-ДПСЗ на повне статичне навантаження

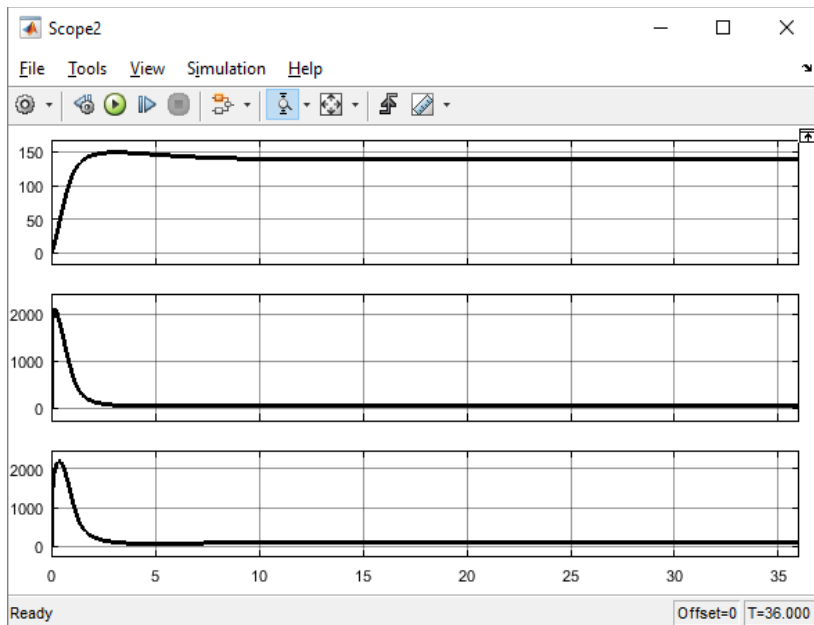




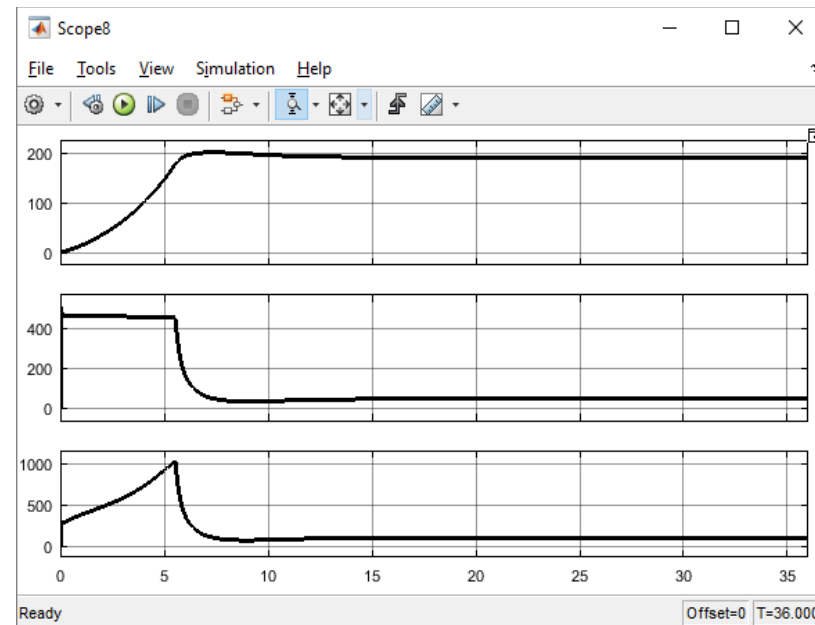
Комп'ютерна модель ДПСЗ, зібрана в програмному середовищі Matlab



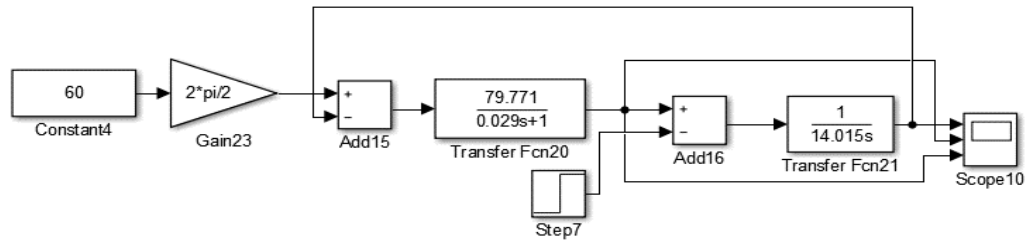
Комп'ютерна модель електропривода ТІСК-ДПСЗ, зібрана в програмному середовищі Matlab



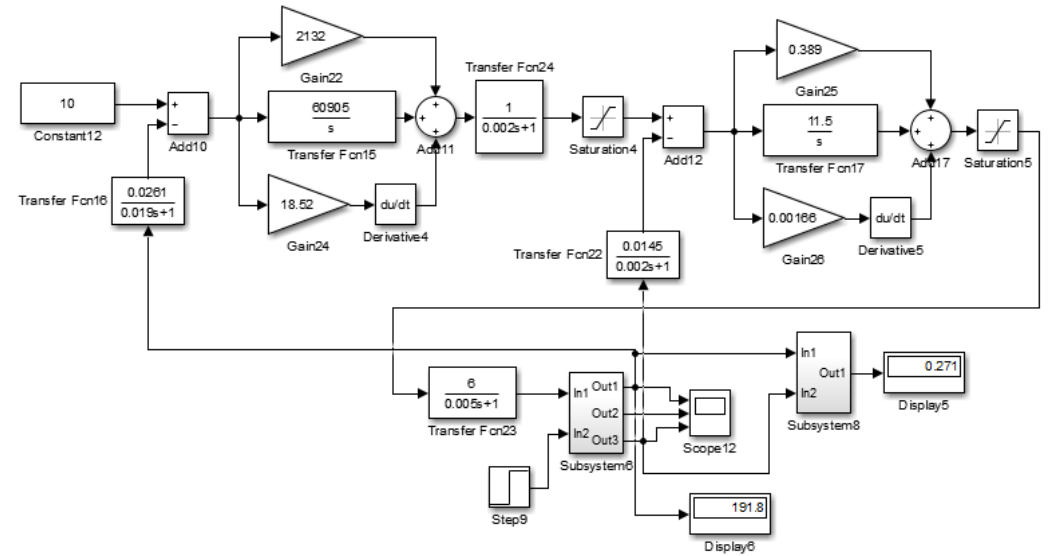
Результати моделювання прямого пуску двигуна ДПСЗ на повне статичне навантаження



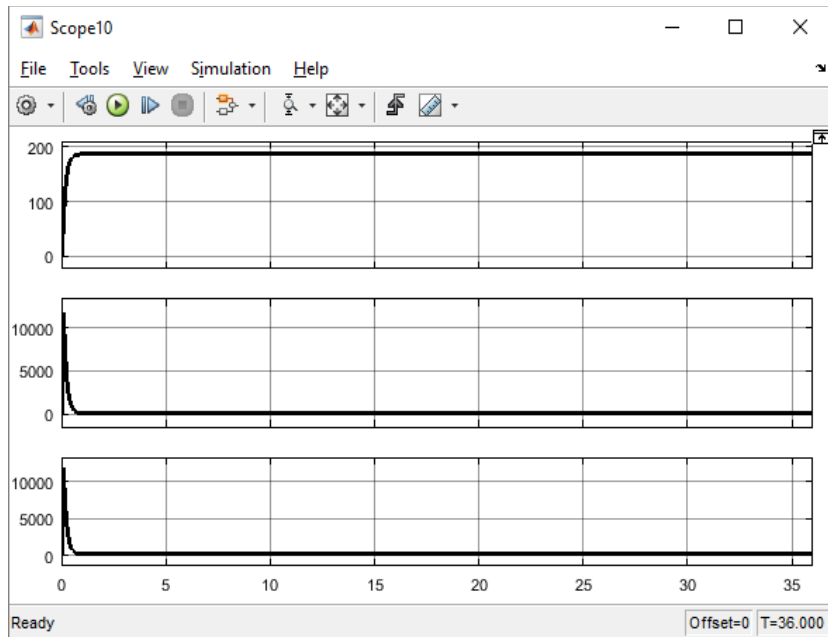
Результати моделювання пуску електропривода ТІСК-ДПСЗ на повне статичне навантаження



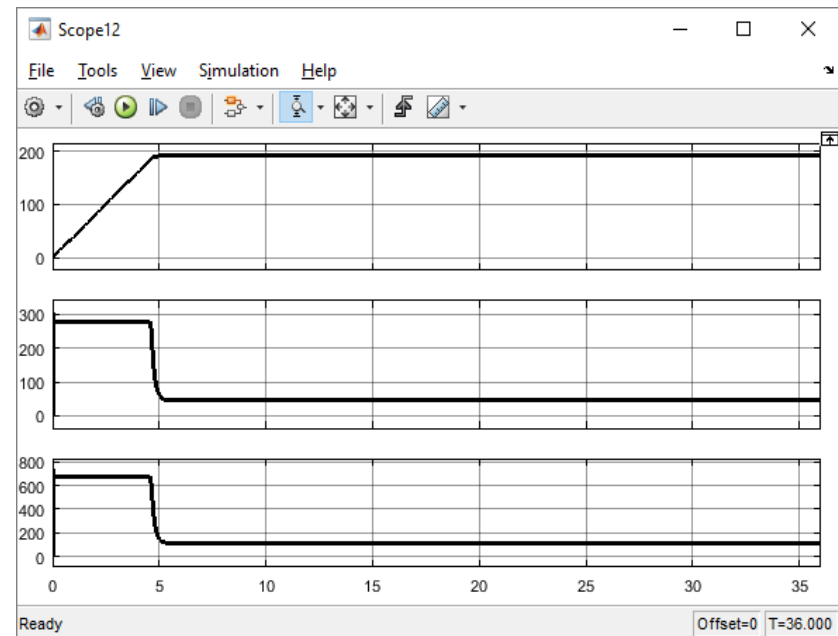
Комп'ютерна модель АД, зібрана в програмному середовищі Matlab



Комп'ютерна модель електропривода ПІ-АД, зібрана в програмному середовищі Matlab



Результати моделювання прямого пуску двигуна АД на повне статичне навантаження

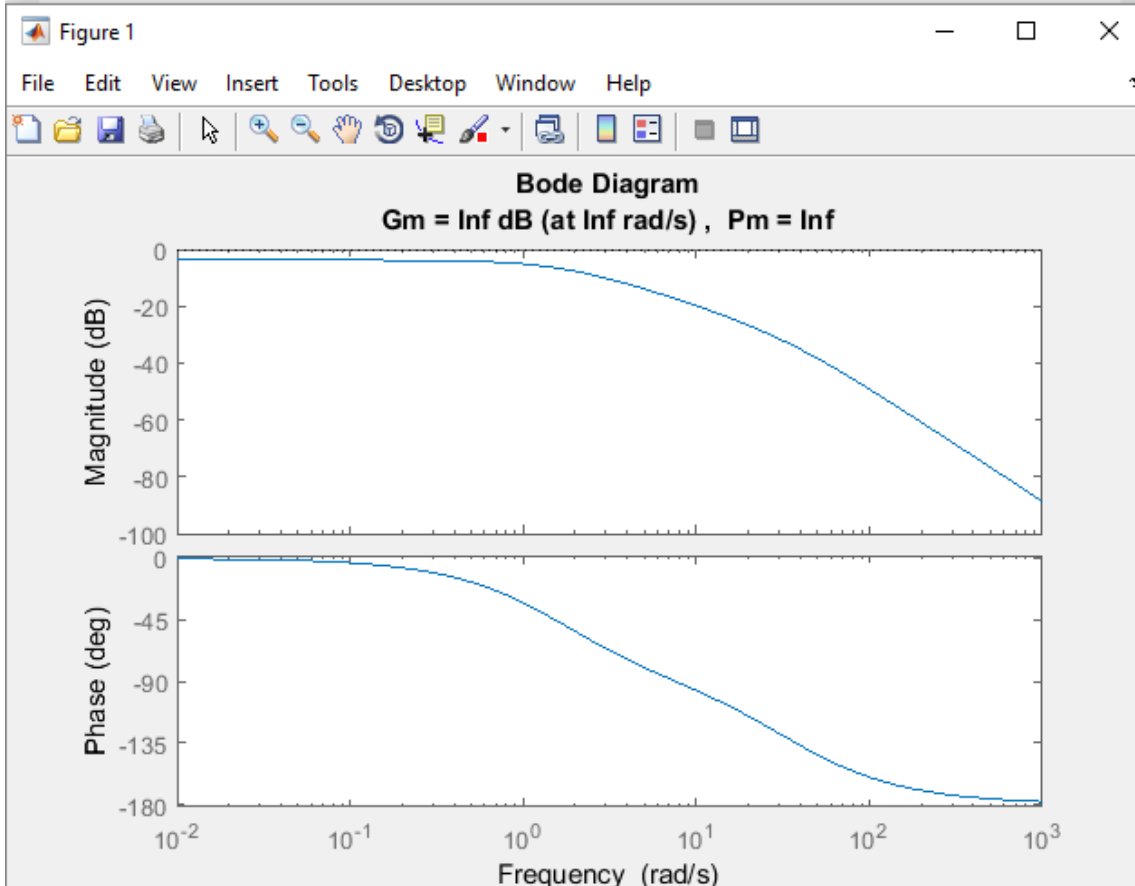


Результати моделювання пуску електропривода ПІ-АД на повне статичне навантаження

```
Command Window
>> wkh01=tf([36.8 1322.0],[1 72 1351.0 2049.0])

wkh01 =

      36.8 s + 1322
-----
s^3 + 72 s^2 + 1351 s + 2049
```

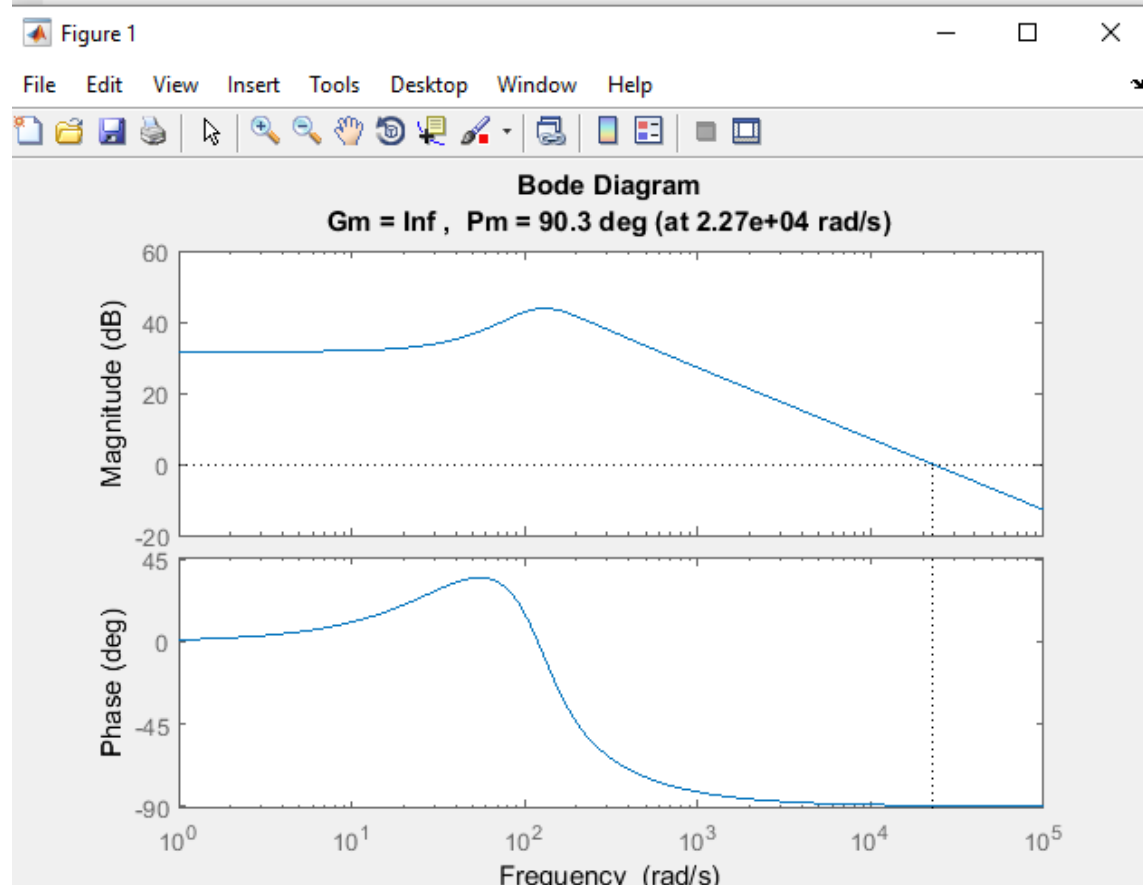


Логарифмічна амплітудо-частотна та фазочастотна характеристики системи електропривода трамвая

```
Command Window
Warning: MATLAB has disabled some advanced graphics rendering features by
>> wkh1=tf([22747.0 8.31e6 7.3e8 1.87e10],[1 500.0 93734.0 9.76e6 4.88e8])

wkh1 =

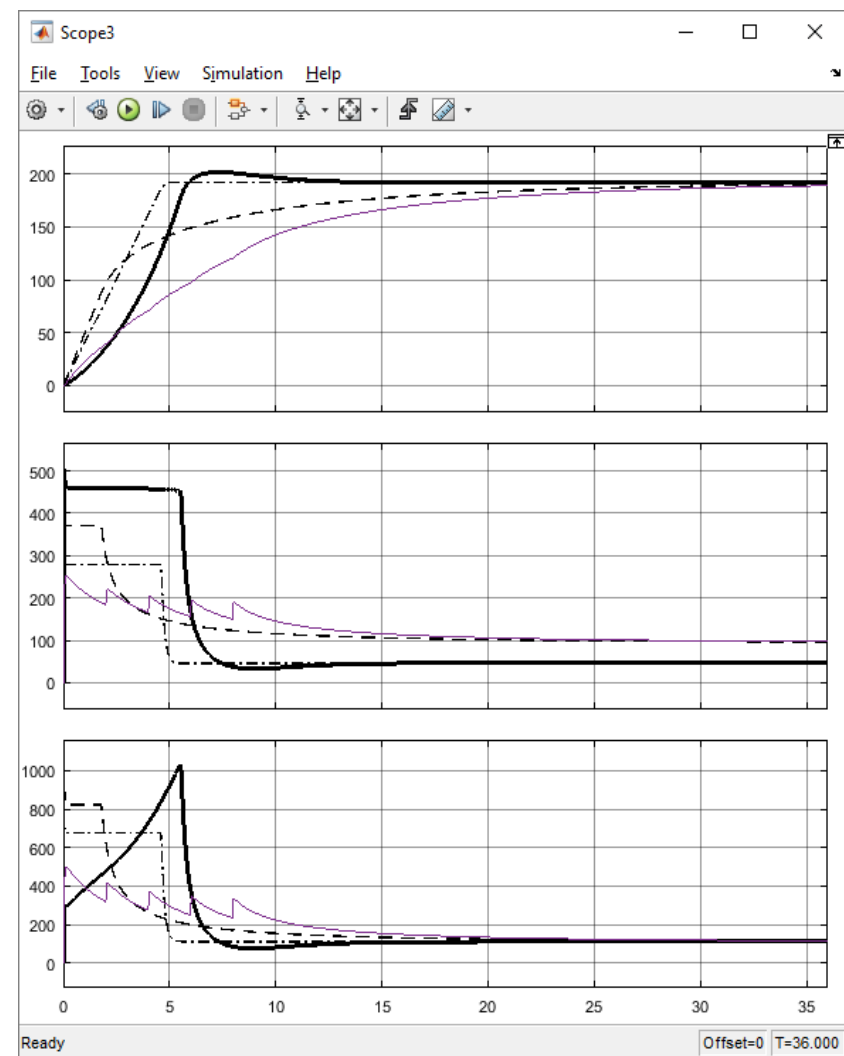
      22747 s^3 + 8.31e06 s^2 + 7.3e08 s + 1.87e10
-----
s^4 + 500 s^3 + 93734 s^2 + 9.76e06 s + 4.88e08
```



Логарифмічна амплітудо-частотна та фазочастотна характеристики системи електропривода трамвая

Параметр\Електропривод	РКС- ДПСЗ	ТІСК- ДПСЗ	ТІСК- ДПСЗЗ	ТІ-АД
Тривалість розгону, с	25	25	7	5
Перерегулювання за швидкістю, %	0	0	3	0
Перерегулювання за струмом / Допустиме значення, %	250/250	250/250	250/250	250/250
Кількість спожитої електроенергії за годину роботи, кВт·год	29	25,8	26,9	27,1
Запас стійкості за амплітудою	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
Запас стійкості за фазою, рад/с	$\infty$	22700	22700	22700

Результати моделювання різних систем електроприводу трамвая



Порівняння перехідних процесів різних систем електроприводу трамвая

## **Висновки:**

Отже, в магістерській кваліфікаційній роботі виконано порівняльну характеристику систем керування електроприводом трамвая з метою визначення найбільш ефективної системи електроприводу. За критерій ефективності обрано швидкість розгону електропривода, наявність і величина перерегулювань під час розгону, кількість спожитої електричної енергії та стійкість керування.

Електропривод з релейно-контакторною системою керування шляхом введення додаткового опору в коло якоря двигуна має найбільші енергетичні затрати і один з найбільших часів розгону (25 с.). Тому дану систему електропривода можна рахувати як найменш ефективну.

Електропривод з транзисторною системою керування та двигуном послідовного збудження має найменші енергетичні затрати, але найдовше розганяється до заданої швидкості обертання (25 с.). Для міського громадського транспорту, де висувається вимога прискорення процесу пасажиропереміщення, час розгону електропривода трамвая 25 с буде занадто великим. Тому дану систему електропривода можна вважати третьою в ієрархії ефективності.

Електропривод з транзисторною системою керування та двигуном змішаного збудження має проміжні енергетичні затрати і відносно малий час розгону. Але дана система працює на найскладнішому колекторному двигуні (змішаного збудження), який потребує великих капіталовкладень та затрат на обслуговування. Крім того двигун постійного струму зміаного збудження має найбільші розміри та вартість порівняно з двигуном послідовного збудження та асинхронним двигуном. Тому дана система електропривода посідає друге місце в ієрархії ефективності.

Електропривод з частотною системою керування та асинхронним двигуном має найкращі динамічні показники і найбільші з поміж трьох останніх систем енергетичні затрати. Але, у процесі моделювання роботи електроприводу не враховувався коефіцієнт корисної дії двигунів, який для асинхронних двигунів суттєво вищий, ніж для двигунів постійного струму. Тому є підстави стверджувати, що сумарні затрати електроенергії для даної системи будуть відносно невисокими. Крім того, асинхронний двигун найдешевший в обслуговуванні і має найменшу ціну та розміри. Отже, дана система може вважатися найкращою з точки зору ефективності керування.

## **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Отримав подальший розвиток підхід до підвищення ефективності роботи тягового електроприводу трамваю, який на відміну від відомих, дозволяє порівняти між собою всі можливі системи тягового електроприводу, що дозволяє оцінити споживання електроенергії кожною з них та дослідити їх динамічні показники. В результаті аналізу можна обрати найкращу систему або за показниками економічності, або за швидкістю перебігу перехідних процесів, або обрати систему, що буде оптимальною за цими двома показниками.

## **Практичне значення одержаних результатів:**

1) Розроблено комп'ютерні моделі таких електроприводів: релейно-контакторна система керування двигуном постійного струму послідовного збудження, транзисторно-імпульсна система керування двигуном постійного струму послідовного збудження, транзисторно-імпульсна система керування двигуном постійного струму змішаного збудження, система тягового інвертора, що забезпечує живлення приводного асинхронного двигуна. Це дозволяє виконати аналіз ефективності роботи кожної з них в різних умовах.

2) Отримано, що найкращі показники енергоефективності керування має система електропривода «Транзисторно-імпульсна система керування двигуном постійного струму послідовного збудження», а найкращі динамічні показники – система «Тяговий інвертор – Асинхронний двигун».