

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки
Кафедра електричної інженерії та електроніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему:

«Дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів у
високовольтному електроприводі підрулюючого пристрою»

Виконав: студент 6 курсу, групи 3601
спеціальності:

271 – «Річковий та морський транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

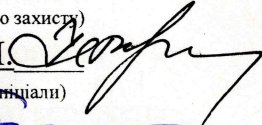
Спеціалізація: «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»

Прокопов В.Ю. 

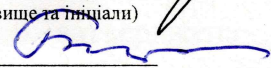
(підпис, прізвище та ініціали)

допущений до захисту 17.12.2021

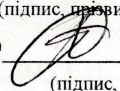
(дата малого захисту)

Завідуючий кафедрою Муха М.Й. 

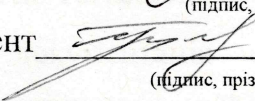
(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник Бушер В.В. 

(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер  Самонов С.П.

(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент  Гвоздева І.М.

(підпис, прізвище та ініціали)

Одеса – 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

Спеціальність: електричні системи та комплекси транспортних засобів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ЕІ та Е

 М. Й. Муха
« 01 » 10 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу магістра

Прокопова Владислава Юрійовича

Тема роботи:

1. «Дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів у високовольтному електроприводі підрулюючого пристрою» затверджена наказом ректора академії від «__» _____ 2021 р. № 1913
2. Термін здачі курсантом закінченої роботи до 18.12.2021 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація судна – технічні характеристики пристрою плавного пуску ABB SSM-60400-E.

4. Змістовна частина розділів дипломної роботи освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» за напрямом підготовки 271 «Річковий та морський транспорт» як зазначено нижче:

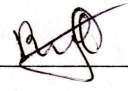
- 4.1. Техніко-експлуатаційні характеристики та конструктивні особливості пристрою плавного пуску.
- 4.2. Дослідження динамічних і статичних характеристик софтстартера з напівкерованими тиристорами.
- 4.3. Дослідження динамічних і статичних характеристик пристрою плавного пуску з повністю керованими тиристорами (GTO).

5. Консультант роботи:

Розділ	Консультант	Підпис і дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів у високовольтному електроприводі підрулюючого пристрою	кафедра ЕІ та Е Бушер В. В.		

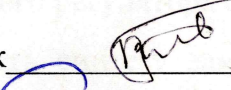
Дата видачі завдання: 16.09.2021 р.

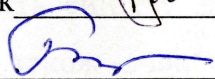
Керівник  Бушер В. В.

Завдання прийняв до виконання  Прокопов В. Ю.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання	Примітки
1	Аналіз техніко-експлуатаційних характеристик та конструктивні особливості пристрою плавного пуску.	16.10 – 20.10.2021	Виконав
2	Розробка моделі пристрою плавного пуску для дослідження динамічних і статичних характеристик софтстартера з напівкерованими тиристорами.	21.10 – 04.11.2021	Виконав
3	Дослідження динамічних і статичних характеристик пристрою плавного пуску з повністю керованими тиристорами (GTO)	05.11 – 04.12.2021	Виконав
4	Синтез регуляторів струму, моменту, швидкості та дослідження динамічних характеристик пристрою плавного пуску з повністю керованими тиристорами (GTO)	05.12 – 14.12.2021	Виконав
5	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини роботи.	10.12.21 – 18.12.21	Виконав

Студент-дипломник  Прокопов В. Ю.

Керівник  Бушер В. В.

РЕФЕРАТ

Дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів у високовольтному електроприводі підрулюючого пристрою

Дипломна робота магістра: 93 с., 46 рис., 4 табл., 1 додаток, 48 джерел.

Мета роботи – модернізація системи електроприводу баутрастерів для підвищення надійності, зменшення механічних ударів і струмів та покращення електромагнітної сумісності з судновою електроенергетичною мережею живлення шляхом використання повністю керованих тиристорів.

В роботі проведено аналіз основних характеристик серійного високовольтного пристрою плавного пуску з силовою частиною на базі тиристорів. Проведено математичне моделювання електроприводу в Matlab/Simulink/Simscape/Electric. Показано, що такі пристрої спотворюють як струми, так і напругу на двигуні та в мережі обмеженої потужності, якою є суднова електроенергетична система.

Запропоновано використання GTO з шунтуючим конденсатором, яке забезпечує високу точність регулювання 1-ї гармоніки напруги. Вперше знайдено мінімальну величину ємності конденсатора – $150...200\mu F$ – і залежності коефіцієнту гармонічних спотворень струму в фазі статора від частоти комутації GTO при дотриманні фізичних характеристик GTO (500–1000 Hz). За таких умов експлуатаційні характеристики пристрою плавного пуску практично не відрізняються від ідеального регулятора фазної напруги асинхронного двигуна.

Показано можливість синтезу замкнених систем зі стабілізацією струму, моменту, швидкості, а також двоконтурної системи з формуванням заданої тахограми при обмеженні моменту.

ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НАПРУГИ, АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ПІДРУЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ, ПОВНІСТЮ КЕРОВАНІЙ ТИРИСТОР

ABSTRACT

Research of electromagnetic and electromechanical processes in a high-voltage electric drive of a bow thruster

Master's thesis: 93 p., 46 figures, 4 tables, 1 annex, 48 sources.

The purpose of the work is to modernize the electric drive system of the bow thrusters to improve reliability, reduce mechanical shocks and currents, and improve electromagnetic compatibility with the electric power grid by using gate turn-off thyristors.

The paper analyzes the main characteristics of the high-voltage soft starter with a power unit based on thyristors. Mathematical modeling of the electric drive was carried out in Matlab / Simulink / Simscape / Electric. It is shown that such devices distort both currents and voltages on the engine and in the ship's electric network with limited power.

It is proposed to use GTO with a shunt capacitor, which ensures high accuracy of regulation of the 1st voltage harmonic. For the first time, the minimum value of the capacitor's capacitance was found – $150...200\mu F$ – and the dependence of the harmonic distortion of the current in the stator phase on the switching frequency GTO, while observing the physical characteristics of the GTO (500–1000 Hz). Under such conditions, the performance characteristics of a soft starter practically do not differ from the ideal phase voltage regulator of an induction motor.

The possibility of synthesis of closed systems with stabilization of current, torque, speed and a two-circuit system with the formation of a given tachogram with torque limitation is shown.

THYRISTOR VOLTAGE CONVERTER, ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE, BOW THRUSTER, A GATE TURN-OFF THYRISTOR (GTO)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ПУСКУ.....	11
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ І СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОФТСТАРТЕРА З НАПІВКЕРОВАНИМИ ТИРИСТОРАМИ.....	30
2.1 Моделювання ідеального пристрою плавного пуску.....	32
2.2 Моделювання тиристорного перетворювача напруги.....	34
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ І СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ З ПОВНІСТЮ КЕРОВАНИМИ ТИРИСТОРАМИ (GTO).....	43
3.1. Модель софтстартера з ідеальними двопровідними ключами....	45
3.2 Моделювання пристрою плавного пуску з фізичними GTO.....	52
4. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ СТРУМУ, МОМЕНТУ, ШВИДКОСТІ ДЛЯ ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ З ПОВНІСТЮ КЕРОВАНИМИ ТИРИСТОРАМИ (GTO).....	70
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	81
ДОДАТОК. Презентація до захисту дипломної роботи магістра.....	86

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СЕЕС – суднова електроенергетична система

ППП – пристрій плавного пуску

ГД – головний двигун

ЕУ – електронне управління

ПУ – пропульсивна установка

ДГ – дизель-генератор

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання

ВГ – валогенератор

ГРЩ – головний розподільний щит

СЕУ – суднова енергетична установка

GTO – Gate turn-off thyristor

PSC – Propeller Shaft Clutch

ВСТУП

Зростаючі технологічні вимоги до якості виробничих процесів, необхідність впровадження високих технологій обумовлюють стійку тенденцію впровадження в різні галузі промислового і морського виробництва регульованих електроприводів.

Розвиток математичної теорії машин змінного струму, створення вдосконалених силових напівпровідникових приладів та перетворювачів на їх основі, використання сучасних засобів управління, включаючи мікропроцесорні, дозволили створити високоякісні та надійні системи регульованих асинхронних електроприводів, які стають основним видом регульованого електроприводу.

На європейському ринку із загального числа проданих регульованих приводів електроприводи змінного струму склали 68%, електроприводи постійного струму - 15%, механічні і гідравлічні приводи - 17%. Тенденція зростання частки впроваджуваних регульованих електроприводів змінного струму об'єктивно збережеться і в подальшому. Крім того, зростання потужності суден веде к поступовій зміні електроприводів на високовольтні. Перетворювачі частоти доки ще являються коштовними пристроями. Якщо за техніко-експлуатаційними вимогами можливо встановлювати підрулюючи пристрої з регульованим кроком гвинта, то оптимальним з технічної та економічної точки зору для цих механізмів стають пристрої плавного пуску, вартість яких в 10–15 разів менше вартості високовольтного каскадного перетворювача частоти. Широке використання регульованих електроприводів призвело до того, що сучасний електропривод є не тільки енергосиловою основою, що дозволяє забезпечити виробничі механізми необхідною механічною енергією, але й засобом управління технологічними процесами, так як завдання з реалізації якості виробничих процесів в даний час у більшості випадків покладаються на системи управління регульованими електроприводами в поєднанні з системами

технологічної автоматики. У зв'язку із зростанням цін на енергоносії, зокрема на електроенергію, і обмеженими можливостями збільшення потужності енергогенеруючих установок проблема енергозбереження, у тому числі зниження електроспоживання, набуває особливої актуальності.

Мета проекту – модернізація системи електроприводу баутрастерів для підвищення надійності, зменшення механічних ударів і струмів та покращення електромагнітної сумісності з судною електроенергетичною мережею живлення шляхом використання в пристроях плавного пуску повністю керованих тиристорів.

Гіпотеза роботи полягає в тому, що при використанні нового класу високовольтних електронних пристроїв – повністю керованих тиристорів (GTO) – можливо суттєво зменшити коефіцієнти гармонічних спотворень за струмом та напругою для забезпечення електромагнітної сумісності пристроїв плавного пуску з судною електроенергетичною мережею при одночасному дотриманні вимог до підрулюючих пристроїв високої потужності.

Для досягнення мети проекту необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проаналізувати характеристики типового пристрою плавного пуску для використання в баутрастерах;
2. Розробити модель та виконати дослідження електроенергетичних та електромеханічних процесів в пристроях плавного пуску з напівкерованими тиристорами;
3. Розробити модель та виконати дослідження електроенергетичних та електромеханічних процесів в пристроях плавного пуску з повністю керованими тиристорами;
4. Синтезувати регулятори струму, моменту, швидкості для пристрою плавного пуску з повністю керованими тиристорами.

1. АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРИСТРОЇВ ПЛАВНОГО ПУСКУ

Пристрої плавного пуску (ППП) серії SSM розроблені для здійснення плавного безударного пуску високовольтних асинхронних і синхронних електродвигунів практично для всіх областей застосування, де не потрібно регулювання швидкості обертання.

Високовольтні PPP типу SSM дозволяють:

- здійснювати плавне наростання / зниження напруги протягом заданого часу при пуску / зупинці двигуна з контролем струму і моменту;
- значно зменшити пускові струми двигунів;
- в мережах з обмеженою потужністю КЗ різко зменшити провали напруги мережі при пуску двигунів;
- істотно знижувати при пуску електродинамічні зусилля на обмотки двигуна і ударні механічні дії на механізми.

Широкий спектр пускових характеристик дозволяє підібрати оптимальну для заданого технологічного режиму, наприклад, дистанційно задати криву для пуску навантаженого і ненавантаженого конвеєра. Існує виконання SSM для реверсивних застосувань. Функція плавного уповільнення дає можливість уникнути гідравлічних ударів (або поштовхів) при зупинці двигуна. Функція малої подачі валу двигуна дозволяє спростити регламентні роботи на приводному механізмі.

Виходячи з потужності та паспортних даних асинхронного електродвигуна підрулюючого пристрою можна обрати необхідний PPP фірми ABB високовольтної серії SSM, SSM-60400-E.

Технічні характеристики пристрою SSM-60400-E	
Напруга, В	6000/7200
Струм, А	400
Потужність, кВт	225-6600
Макс. потужність (при 1200 А), кВт	10430
Клас захисту	IP 54

Даний пристрій має такі технічні характеристики:

Перевантажувальна здатність

125% постійно

500% протягом 60 секунд

600% протягом 30 секунд

1400% 1 період мережевої напруги

Пікова зворотня напруга (ПЗН) для тиристорних модулів:

Напруга моделі SSM, кВ	ПЗН, В
6	19500

ККД:

При роботі з шунтувальним контактором 99,94%

При пуску: 99,7%

Вакуумний шунтуючий контактор

Поставляється стандартно у всіх моделях. Розрахований на пускові струми при прямому підключенні до мережі.

Цифровий пульт оператора

Пульт оператора з клавіатурою і РК-дисплеєм з підсвічуванням (2 рядки по 20 символів). Світлодіодні індикатори стану («Живлення», «Робота», «Сигналізація», «Аварія») і 8 індикаторів стану вихідних реле.

Зовнішні програмовані виходи:

8 повністю програмованих користувачем релейних виходів (сухий контакт

4A/240 В). 5 фіксованих релейних виходів («несправність», «повна швидкість» і т.п.)

Встановлювані параметри двигуна

Номинальна частота мережі, напруга, струм, експлуатаційний коефіцієнт, клас ізоляції обмоток, клас перевантаження.

Два незалежних налаштування для параметрів:

Початкова напруга	0-100% $U_{ном}$.
Обмеження струму	Обмеження струму 200-600% $I_{ном}$.
Час плавного розгону	Час плавного розгону 1-120 с

Три заданих користувачем кривих розгону (задається залежність напруги від часу) Час плавного уповільнення 1-60 с. Час дії підвищеної 0,1-2 с. напруги (10-100%) на початку пуску.

Статистичні данні.

Час пуску, час попереднього запуску, середній пусковий струм, кількість відключень за видами, архівація останніх 60 подій (дані включають в себе причину події, дату і час виникнення, величини фазних струмів і струму витоку, лінійних напруг, коефіцієнта потужності, рівня несиметрії струмів).

Вимірювальні функції.

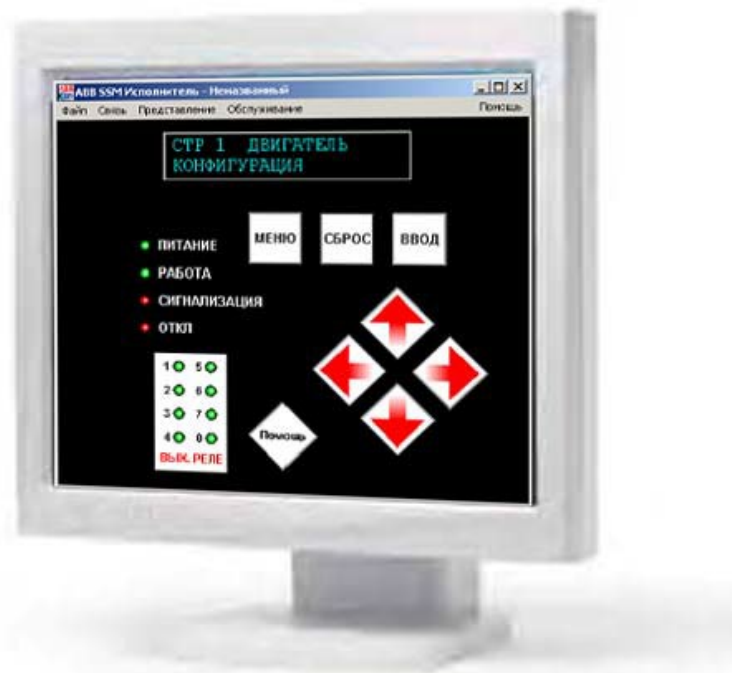
Вимірюються і індикуються: відсоткова (до номінального) величина струму в навантаженні, фазні струми, повна, активна і реактивна потужності, коефіцієнт потужності, середній пусковий струм, вміст регістра нагріву, необхідна для пуску і поточна накопичена теплова ємність, час з моменту останнього пуску, частота напруги живлення, чергування фаз, показники датчиків температури (опц.).

Зв'язок.

Порт RS 485, протокол Modbus RTU, порт RS 232 з Windows інтерфейсом.

Підключення до персонального комп'ютера.

Для зручності користувача програмування установок SSM і їх зберігання можна здійснювати на персональному комп'ютері. Для цих цілей розроблено Windows сумісне програмне забезпечення SSMWIN. Програма повністю дублює пульт оператора на екрані ПК, а для зв'язку з пристроєм використовується інтерфейс RS 232.



Об'єднання в мережу.

Для моніторингу в режимі реального часу, управління і програмування уставок використовується стандартний RS-485 порт, зв'язок здійснюється по протоколу Modbus RTU. Об'єднання пристроїв в мережу (до 247 пристроїв) здійснюється для швидкого зчитування з них даних, таких як діючі струми, напруги, коефіцієнти потужності, струми витоку на землю і т.п.

Також можливо здійснювати дистанційне керування будь-яким пристроєм в мережі. Все, що можна зробити з пульта управління, може бути здійснено і програмним шляхом.



Функціонально пристрій включає:

1. Пульт оператора для програмування функцій захисту і параметрів ППП;
2. Оптично розв'язаний низьковольтний відсік;
3. Вбудований трансформатор ланцюгів управління * і вимірювальні трансформатори;
4. Роз'єднувач, розрахований на можливість розриву ланцюга при повному струмі навантаження і блокуючий відкриття дверей ППП при його замиканні *;
5. Заземлювальна шина і ножі, видимі через оглядове вікно *;
6. Силові запобіжники з індикацією перегорання *;
7. Ввідний вакуумний контактор *;
8. Шунтувальний контактор, розрахований на пряме підключення двигуна до мережі;
9. Тиристорні модулі з гальванічною розв'язкою сигналів управління і підвищеною надійністю ланцюгів управління;

10. . Додаткова плата для підключення датчиків температури (до 12 резистивних датчиків);

11. Датчик струму витoku на землю;

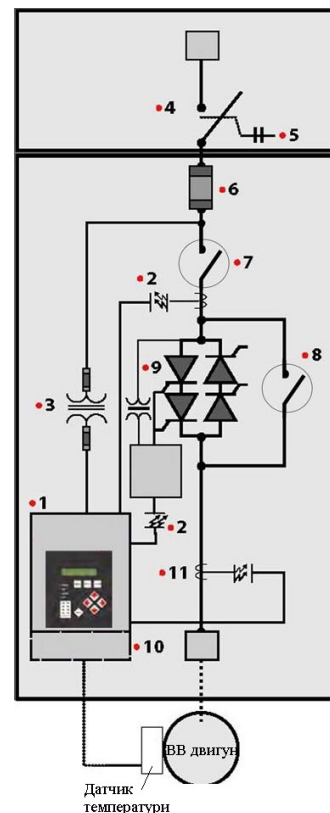
12. Введення кабелю силового живлення здійснюється, як правило, зверху або збоку шафи, вивід на двигун - знизу. Для зручності монтажу застосовуються з'ємні панелі;

13. Сталевий корпус утворює жорстку конструкцію і має ступінь захисту IP54, IP21 або IP00.

* Можлива поставка ППП без вбудованої вступної комірки. У такому виконанні ППП не містить роз'єднувач, запобіжники, вступної контактор і трансформатор ланцюгів управління. Для роботи необхідна високовольтна вступна осередок замовника. Зовнішній вигляд шафи, функціональну схему силової частини та схему зовнішніх підключень зображено на **рис. 1.1**.



а)



б)

Короткі технічні характеристики пристроїв плавного пуску.

Конструкція

1. Кожен ППП є комплектним, автономним пристроєм однобічного обслуговування. Силова частина включає в себе ввідний роз'єднувач, розрахований на вимикання повного струму навантаження, силові плавкі запобіжники, закріплені ввідний і обвідний вакуумні контактори, блок силових тиристорів.

2. З метою мінімізації компонентів і підвищення тим самим надійності ППП цифровий контролер керування тиристорами виконує одночасно і функції захисту двигуна. Захисту працюють як в режимах пуску і плавного зупинки, так і при роботі двигуна безпосередньо від мережі з включеним обвідним контактором. Спеціалізованого пристрою РЗА не потрібно.

3. Для зручності експлуатації ППП виконані за принципом Plug and play, тобто потрібно лише підключення входу до мережі живлення (3 фази) і виходу - до двигуна (3 фази). Всі міжблочні зв'язки, захист двигуна, джерела живлення і т.д. виконані всередині самого пристрою, додаткових блоків, кабелів, напруг ланцюгів керування, монтажних робіт не потрібно.

4. З метою підвищення надійності ППП з номінальним струмом нижче 400 А виконуються невентильованими (відсутні вентилятори охолодження). Всі ППП мають ступінь захист не нижче IP54 (стандарт) або IP 64 (опція) для роботи в умовах підвищеної забрудненості.

5. Для зручності проектування і розміщення на об'єкті конструкція ППП передбачає можливість двох варіантів його підключення:

а) вбудовування в щит КРП (шинний підключення). У цьому випадку необхідність у зовнішній осередку введення (вимикачі) з пристроєм РЗА відпадає (економія - 20-30 kUSD на один пристрій), досягається подвійне зниження займаної площі, подвійне збільшення часу напрацювання на відмову.

б) підключення кабелем знизу, зверху, ззаду або з обох боків. У цьому випадку (опція за бажанням Замовника) живлення ППП здійснюється через зовнішню (надлишкову) високовольтний елемент. Наявність же вбудованих в ППП ввідного і обвідного контакторів дозволяє тримати вимикач цієї зовнішньої ячейки постійно включеним і напругу живлення - постійно підведеними до ППП, а робочі комутації виконувати контакторами. Це дозволяє зовнішньому вимикачу працювати в заощаджуваному режимі за рахунок зниження числа комутацій, однак, підвищуються розміри і загальна ціна технічного рішення.

Роз'єднувач.

1. Привід роз'єднувача виконується за допомогою зовнішньої рукоятки, що забезпечує наглядну індикацію положення роз'єднувача. Для безпеки персоналу відсік з роз'єднувачем ізолюваний від всіх інших компонентів пристрою.

2. При розмиканні роз'єднувача його ножі автоматично заземлюють нижче розташовані за схемою силові ланцюги ППП. Цим забезпечується розряд будь-якої енергії, накопиченої в колах навантаження (кабелях) в момент роз'єднання. Конструкція забезпечує візуальне (через оглядове вікно) підтвердження розмикання і заземлення ножів роз'єднувача.

3. З метою запобігання несанкціонованому включення рукоятка роз'єднувача дозволяє її замикання у відключеному положенні шляхом установки до трьох висячих замків.

Вакуумні контактори.

1. Контактори закріплені болтами в високовольтному відсіку. Силові з'єднання виконані так, щоб бути доступними спереду, полегшуючи проведення технічного обслуговування.

2. Для ППП з годув напругою 6 кВ номінальну напругу контактора становить не менше 7,2 кВ.

3. У разі несправності блоку силових тиристорів обвідний контактор має можливість шунтувати цей блок по зовнішній команді керування (сухий контакт), дозволяючи прямий пуск від мережі.

Блок силових тиристорів.

1. Номінальний зворотне пікова напруга (PIV):

Щоб гарантувати високу надійність пристрою, для ППП з номінальною напругою 6 кВ допустиме зворотне пікова напруга (PIV) кожної фази тиристорів становить не менше 19,5 кВ.

2. Перевантажувальна здатність.

Для максимального використання можливостей двигуна з розвивального моменту на валу, в пускових режимах блок силових тиристорів витримує струм $I = 500\% I_{ном}$ або $I = 600\% I_{ном}$ (майже прямий пуск) протягом 60 с і 30 с відповідно (немає аналогів в світі).

3. Завадостійкість:

Для виключення вірогідності помилкового включення транзисторів або не включення їх в потрібний момент і викликаной цим несиметрії вихідних напруг і струмів в умовах провалів і перешкод електроживлення, ланцюги відмикання затворів тиристорів (драйвери) захищені від електричних перешкод наступними способами (немає аналогів в світі):

а) Джерело живлення для кожного драйвера виконаний індивідуальним і ізольованим від напруги мереж керування за допомогою високонадійних компаундированих кільцевих трансформаторів.

б) Керуюча напруга затвору формується не у вигляді серії послідовних імпульсів, а зберігається постійним протягом 240 електричних градусів від точки перетину нуля, тим самим моментально повторно включаючи тиристор, навіть якщо він і закриється в результаті провалу напруги мережі і зниження струму до нуля.

с) Алгоритм керування тиристорами забезпечує рівне в кожній фазі симетричну напругу на виході пристрою в процесі розгону і плавної зупинки навіть при асиметрії і пульсаціях напруги живлення. Це виключає биття моменту на валу двигуна і надлишкові зусилля на механічні зчленування, виключає додатковий нагрів обмоток двигуна гармоніками струму, викликаними несиметрією, і збільшує термін служби ізоляції двигуна.

д) Для захисту від електромагнітних і (або) радіочастотних перешкод, створюваних внутрішніми компонентами, і відсутності помилкових спрацьовувань захистів:

d1. Канали керування драйверами тиристорів виконані волоконно-оптичними;

d2. Канали зворотного зв'язку по струму кожної фази тиристорів виконані волоконно-оптичними;

d3. Інформаційні канали по температурі радіаторів кожної фази тиристорів виконані волоконно-оптичними;

d4. Інформаційний канал по току нульової послідовності (витоку на землю) виконаний волоконно-оптичним.

4. ППП не вимагає установки лінійних (мережевих) реакторів при роботі від мережі в умовах промислових перешкод і провалів напруги.

Силові запобіжники.

1. Кожен силовий запобіжник має індикацію перегорання.

2. Передбачено захист, що знімає управління з тиристорів і розмикатиме вакуумні контактори при перегорання будь-якого із запобіжників.

Блокування.

1. Передбачено механічне блокування між роз'єднувачем і дверима низьковольтного відсіку. Воно перешкоджає відкриттю дверей до повного замикання роз'єднувача, а також перешкоджає включенню роз'єднувача при відкритих дверях високовольтного відсіку.

2. Блокування, описана в п. F1, допускає можливість обходу в разі, коли це буде потрібно в аварійній ситуації або при пуско-налагоджувальних роботах, сертифікованим фахівцем. Для обходу блокування потрібне застосування інструменту.

3. Передбачено не менше двох електричних блокувань, що забороняють включення ППП (пуск двигуна) при наявності несправності в технологічному обладнанні на об'єкті (сухий контакт).

Для керування запуском, роботою та зупинкою ППП, не потрібно використовувати PLC. Він вже вбудований в пристрій та запрограмований на такі режими пуску як:

1. Лінійний ріст напруги;
2. Лінійний ріст напруги з урахуванням обмеження струму;
3. Лінійний ріст струму до заданого рівня;
4. Стрибок струму з утриманням його на заданому рівні;
5. Лінійний ріст швидкості (постійне прискорення) (при наявності імпульсного або аналогового датчика швидкості);
6. Лінійний ріст потужності;
7. Розгін по довільній діаграмі (до трьох діаграм в пам'яті УПП) - для узгодження умов пуску з будь-яким навантаженням, наприклад, для швидкого проходження критичних швидкостей насосного (компресорного) агрегату;
8. Поштовховий пуск - для початкового поштовху механізму з високим стартовим опором (тертям);
9. Рух на зниженій швидкості (5 ... 75% номінальної напруги)

Час лінійного росту заданого параметра (напруга, струм, швидкість, потужність) програмується в діапазоні 0 ... 120 с (без урахування часу роботи ППП на струмообмеження).

Управління гальмуванням:

1. Уставки для управління гальмуванням задаються незалежно від уставок розгону. Спосіб управління з заздалегідь програмованим алгоритмом гальмування, що не допускають побудову робочої діаграми гальмування відповідно до вимог конкретного навантаження, не використовується в даних УПП.

2. Час гальмування регулюється в діапазоні 0 ... 60 с, напруга початку і закінчення гальмування регулюється в діапазоні 100 ... 0% напруги мережі.

Дискретні і аналогові вхідні сигнали.

Функція управління ПУСК / СТОП має інтерфейс з напругою 110В змінного струму, щоб уникнути потенційних проблем при падінні напруги живлення, і має дві опції:

1. 2-провідне виконання: ПУСК - контакт замкнутий, СТОП - контактор розімкнутий;

2. 3-дротове виконання: ПУСК - короткочасне замикання АЛЕ контакту, СТОП - короткочасне розмикання НЗ контакту;

Є чотири конфігуруються дискретних входу (сухий контакт), які можуть:

1. Допускати програмування їх назви;

2. Допускати програмування умов спрацьовування - по замиканню або розмиканню контакту;

3. Допускати витримку часу на спрацьовування в діапазоні 0 ... 60 с.

Є один аналоговий вхід 4 ... 20 мА і вхід для сигналів імпульсного датчика для підключення тахометра з метою реалізації функцій розділів з використанням цих підключень.

Функції оперативного керування.

1. Мікропроцесорний блок з пультом керування (ЦПУ):

а) Блок ЦПУ забезпечує реалізацію алгоритмів керування і захистів, індикацію стану ППП за допомогою дворядкового рідкокристалічного дисплея з вбудованими функціональними клавішами і діагностичними світлодіодами. Для

програмування на ЦПУ не використовуються двохпозиційні перемикачі з двійковим кодом.

б) Індикатори на світлодіодах видають відомості:

- В1. про наявність живлення;
- В2. про стан ППП - робота / відключення;
- В3. про стан кожного вихідного реле.

с) Передбачено захист кодованим паролем для виключення несанкціонованого зміни запрограмованих параметрів. Крім того, в особливо відповідальних випадках зняттям зовнішньої апаратної перемички Замовника (замість малонадійного мікроперемикача) повністю забороняється редагування параметрів з метою попередження їх випадкового зміни або стирання.

2. Пристрій, що запам'ятовує (ЗП):

ЗУ на мікросхемах зберігає свої дані в разі відключення електроживлення. Стан оперативного ЗУ при цьому запам'ятовується в ЗУ типу EEPROM і відновлюється після відновлення живлення.

3. Годинник реального часу.

Передбачені годинник реального часу з автоматичним оновленням у високосний рік. Для цього годинника використовується батарейне електроживлення, розраховане мінімум на 10 років. Годинники допускають скидання і установку в польових умовах після заміни батареї, не впливаючи на іншу накопичену інформацію.

Дискретні та аналогові вихідні сигнали.

Є вісім дискретних виходів (вбудованих реле) з перемикаючими контактами на 240 В змінного струму, номінальним струмом 5 А і світлодіодним індикацією стану.

Є два програмованих аналогових виходу 4 ... 20 мА для видачі на кожен вихід інформації про один з таких параметрах двигуна:

1. Швидкість двигуна, об / хв;

2. Найбільшу температуру з 2-х підшипників двигуна, град С;
3. Найбільшу температуру з 6 термодатчиків в трьох обмотках статора, град.С
4. Діючий струм двигуна, А
5. Завантаження двигуна по відношенню до номіналу, %

Сигнали від резистивних датчиків температури (РДТ).

Є дванадцять програмованих входів для прийому сигналів від датчиків температури наступних типів:

1. Платинові 100 Ом (Pt 100)
2. Нікелеві 100 Ом (Ni 100)
3. Нікелеві 120 Ом (Ni 120)
4. Мідні 10 Ом (Cu 10)

Кожному датчику може бути присвоєно ім'я довжиною до 15 символів (включно з пробілами) і встановлені власні рівні сигналізації і відключення.

Для датчиків температури статора передбачена опція, коли УПП не відключиться, поки два датчика фази не перевищать заданий рівень. Це дозволяє усунути часте відключення пристрою за сигналами датчиків температури.

Вимірювання та індикація.

Передбачено вимір і видача на індикатор дисплея наступних параметрів:

1. Вихідний струм по кожній фазі і середнє значення по трьом фазам;
2. Навантаження електродвигуна (в% від номінального струму);
3. Лінійна напруга кожної пари фаз;
4. Частота мережі;
5. Чергування фаз;
6. Струм витоку на землю;
7. Поточні повна (кВА), активна (кВт), реактивна (кВАр) потужності, коефіцієнт потужності, сумарне споживання електроенергії (МВт-год);

8. Відсоток залишкової здатності двигуна витримувати теплові навантаження (100% у разі повного охолодження);

9. Теплове навантаження при пуску (середнє значення за трьома або більше попереднім успішним пусків);

10. Середня тривалість пуску (за даними не менше трьох попередніх успішних пусків);

11. Середній пусковий струм (за даними не менше трьох попередніх успішних пусків);

12. $I * I * T$ для останнього пуску;

13. Тривалість останнього пуску;

14. Температура від 12 датчиків температури;

15. Стан електродвигуна: ГОТОВИЙ, ПУСК, РОБОТА, ПРИЧИНА ОСТАННЬОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ.

16. Дані за останнім спрацьовування захисту: причина, фазні струми і струми витоку на землю, дисбаланс фаз, частота, самі нагріті РДТ на статорі і поза статора.

17. Залишковий час до відключення по перевантаженню, блокування по температурі, блокування при вибігу, часу між пусками і по числу пусків в годину;

18. Архів не менше ніж по 60 останніх подій із зазначенням фазних струмів і струмів витоку на землю для кожного з них;

19. Статистика по числу відключень кожного виду захистів;

Захист двигуна і ППП.

Як під час пуску, так і при подальшій роботі від мережі (після шунтування тиристорного блоку обвідним контактором) здійснюється сигналізація і повний захист двигуна і ППП, що перевищує функціональні можливості звичайних пристроїв релейного захисту. Кожна захист має незалежні уставки для сигналізації і спрацьовування (відключення ППП) і програмується для її фіксації

на дискретних виходах / реле (до трьох виходів). Перелік сигналізації і захистів включає в себе наступні їх види відповідно до класифікації ANSI:

1. Від максимальної / мінімальної частоти обертання (попадання в вилку швидкостей) (ANSI 12/14) (за умови установки імпульсного або аналогового датчика швидкості)

2. Від зниження напруги живлення (ANSI 27)

3. Від зниження струму навантаження (ANSI 37).

4. Від перегріву підшипників двигуна і обмоток статора (ANSI 38/49)

5. Від не симетрії фазних струмів або обриву фази (ANSI 46)

6. Від зворотного чергування фаз напруги живлення (ANSI 47)

7. Від затягнутого пуску і блокування ротора двигуна (ANSI 48)

8. Від теплових перевантажень двигуна (електронна тепловий захист) (ANSI 49).

а) Використовується тепла модель двигуна, яка фіксує в спеціальному тепловому регістрі поточну кількість теплоти, накопичене двигуном. Захист спрацьовує при перевищенні уставки відповідно до стандартного класом двигуна по нагрівостійкості (5 ... 30) або відповідно до модифікованої кривої $I = f(t)$, яка визначається Замовником для конкретного двигуна (основний спосіб захисту).

б) Застосовується пам'ять теплового стану двигуна при збої або відключення живлення, що враховує триваючий процес його охолодження в відключеному стані. Після відновлення електроживлення дані про тепловий стан двигуна автоматично оновлюються з урахуванням фактичного охолодження двигуна за час відсутності електроживлення. Багаторазове включення / відключення напруги ніяк не відбивається на пам'яті теплового стану двигуна.

в) ППП запам'ятовує необхідну для запуску двигуна кількість теплоти, усереднене за даними декількох попередніх успішних пусків (не менше трьох).

Після відключення по перевантаженню захист блокує повторний пуск до тих пір, поки двигун не охолоне до стану, з якого можливий успішний пуск.

d) Крім основного способу захисту при пуску передбачені два альтернативні способи захисту:

d.1) Захист що задається виробником електродвигуна або вимірним експериментально при пуско-налагоджувальних роботах критичного значення параметра I_2t , побічно відбиває кількість теплоти, накопичене двигуном. Вимірювання значення I_2t проводиться автоматично і відображається на індикаторі пульта управління.

d.2) Захист по відхиленню від оптимального графіка пуску $I = f(t)$. ППП переводиться в режим навчання і запам'ятовує по точках з часом запам'ятовування до 300 з графік пуску $I = f(t)$, прийнятого за оптимальний. ЦПУ порівнює графіки наступних пусків з оптимальним і ініціює захист при їх відхиленні на величину більш заданої уставки.

е) У пам'яті ЦПУ можуть бути розраховані криві і задані уставки захистів окремо для режиму пуску і для робочого режиму на повній швидкості (з обвідним контактором). Це дозволяє задавати більш високий рівень захисту в пусковому режимі, щоб уникнути частих відключень при розгоні, і нижчий її рівень для точної захисту двигуна в робочому режимі.

9. Від максимального струму в фазах двигуна (до 14 Іном - електронний миттєвий захист) (ANSI 50)

10. Від максимального струму перевантаження (ANSI 51)

11. Від витоку на землю (миттєва або з витримкою часу) (ANSI 50N/51G/N)

12. Від догляду коефіцієнта потужності за допустимі верхній / нижній межі (ANSI 55)

13. Від неприпустимого підвищення напруги живлення (ANSI 59)

14. Від максимальної кількості пусків в годину (1...6) / мінімального часу між пусками (0...60 хв) / часу між зупинкою і пуском (0 ... 60 хв) (ANSI 66)

15. Від максимальної / мінімальної частоти мережі живлення (ANSI 81H / 81L)
16. Від скидання захисту і подальшого пуску двигуна при спрацьовуванні певних захистів (блокування включення) (ANSI 86)
17. Диференційний захист двигуна (ANSI 87) (за умови установки додаткових датчиків струму)
18. Від перевищення середньої споживаної активної потужності (кВт) (відсутній в обов'язкових вимогах ANSI)
19. Від перевищення середньої споживаної реактивної потужності (квар) (відсутній в обов'язкових вимогах ANSI)
20. Від перевищення середньої споживаної повної потужності (кВА) (відсутній в обов'язкових вимогах ANSI)
21. Від перевищення середнього струму навантаження за певний період часу (відсутній в обов'язкових вимогах ANSI)
22. Від перегріву тиристорного блоку. У радіаторах кожної фази тиристорів встановлені термодатчики, підключені до одного з програмованих входів ППП, який налаштований на заводі-виробнику в якості входу захисту від перегріву (відсутній в обов'язкових вимогах ANSI)
23. Від несправності обвідного контактора (НЕзамикання або НЕрозмикання при відповідній команді управління) (відсутній в обов'язкових вимогах ANSI)
24. Від несправності тиристора або КЗ в навантаженні (перевірка перед пуском). У режимі пуску від ППП подається початкова мала напруга на двигун протягом першої 1/4 секунди часу розгону і контролюється струм. У разі його надшвидкого зростання пуск забороняється з метою попередження подальших пошкоджень обладнання (відсутній в обов'язкових вимогах ANSI).
25. Від несправності датчиків температури обмоток статора або підшипників двигуна (відсутній в обов'язкових вимогах ANSI).

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ І СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОФТСТАРТЕРА З НАПІВКЕРОВАНИМИ ТИРИСТОРАМИ

Для дослідження обираємо типовий потужний високовольтний двигун ABB AMD710L8T.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики АД марки ABB/AMD710L8T

Номінальна потужність	1970 kW	Коефіцієнт потужності	0.89
Напруга	6600 V	Номінальний момент	21041 Nm
Частота	60/50 Hz	Відносний пусковий струм	6.3
Частота обертання	894/745 rpm	Відносний пусковий момент	1.1
Струм	201 A	Відносний макс. момент	2.2
Параметри схеми заміщення			
Опір статору R1 (120°C)	1.753693	Опір ротору R2' (40°C)	1.221971
Індуктивність статору L1	0.002049	Індуктивність ротору L2'	0.002049
Індуктивність намагнічування L0	0.052162		
Момент інерції ротора		516 kgm ²	

За допомогою програмного забезпечення Matlab/Simulink/SimScape/Electric розрахуємо електромеханічні перехідні процеси прямого пуску асинхронного двигуна з урахуванням вентиляторного навантаження (Рис. 2.1).

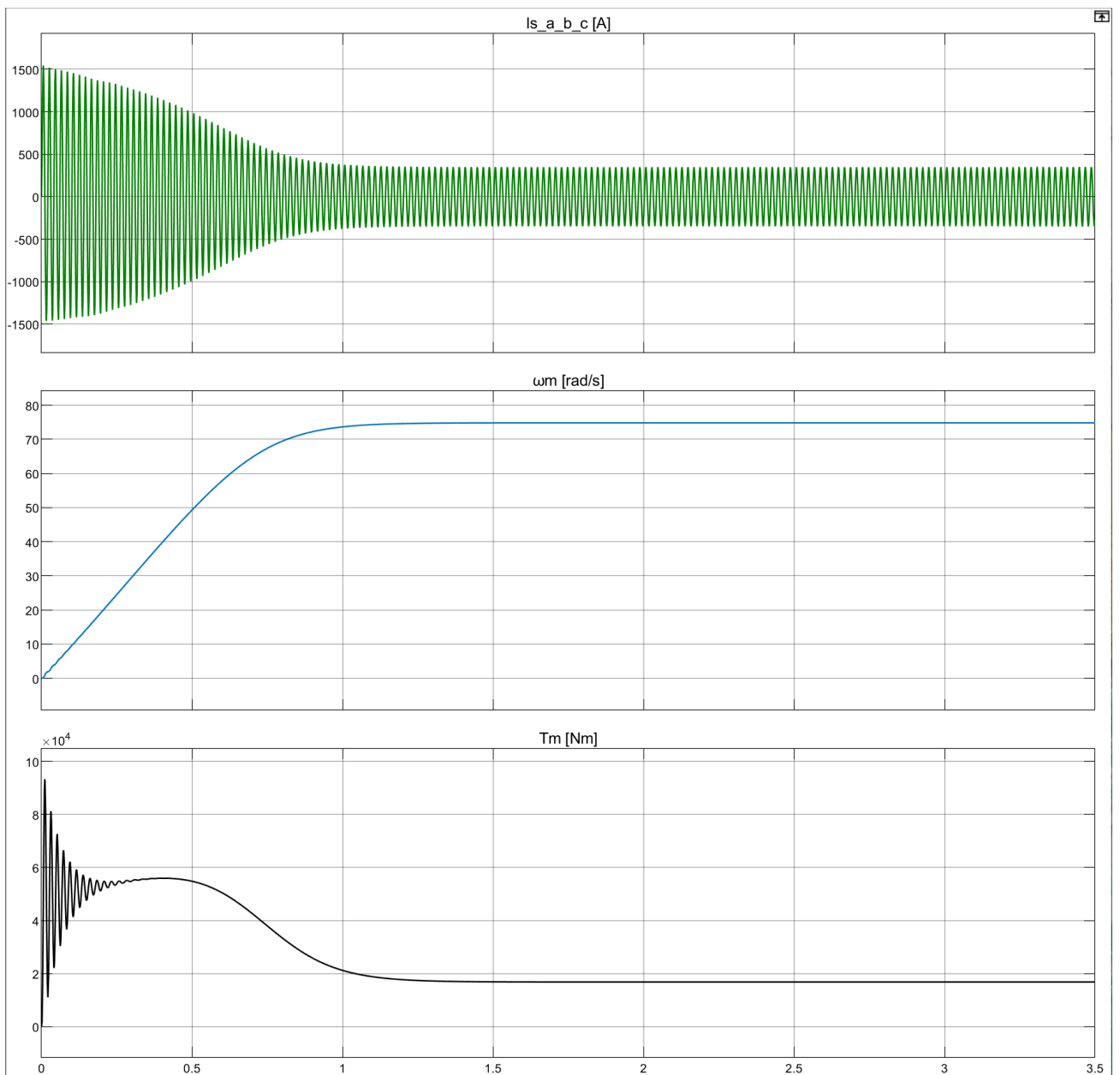


Рисунок 2.1. – Прямий пуск асинхронного двигуна з вентиляторним навантаженням

Пусковий струм в 6 разів перевищує номінальний (залежно від параметрів двигуна піковий струм може сягати 7...9 номінального), а піковий електромагнітний момент в 5.5 разів перевищує номінальний, причому середнє значення на початку пуску може бути менше номінального.

2.1 Моделювання ідеального пристрою плавного пуску

Для зменшення ударних механічних та електричних навантажень під час пуску механізмів з вентиляторною характеристикою бажано поступово збільшувати напругу з деякої мінімальної до номінальної. Мінімальне значення визначається за допустимими показниками – максимальним ударним моментом або піковим струмом. На рис. 2.2 зображено такий ідеальний перехідний процес, отриманий шляхом генерування трифазної системи напруг з лінійно зростаючою амплітудою від мінімального значення 0.1 до номінального значення 1 за 3 s.

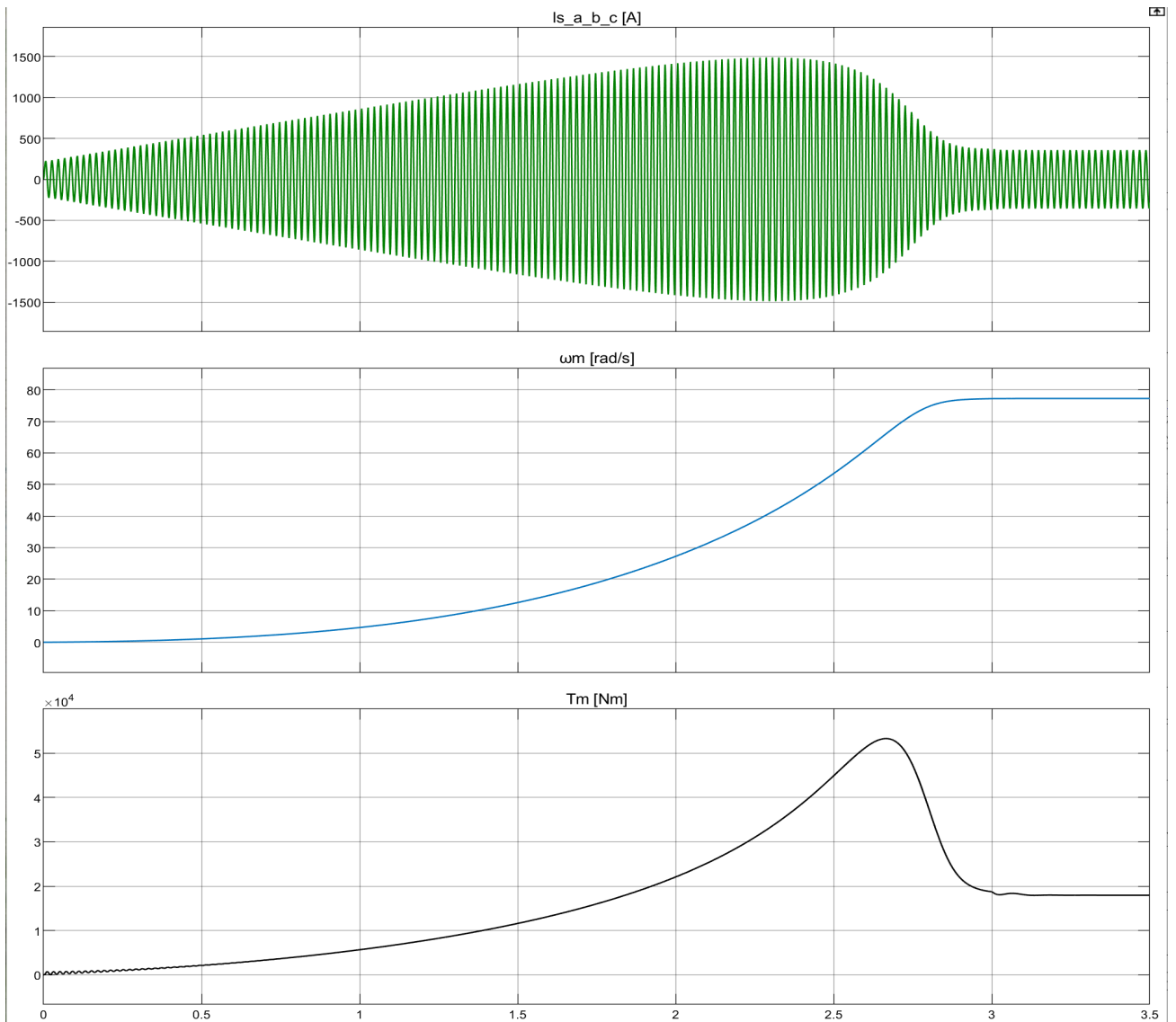


Рисунок 2.2. – Пуск асинхронного двигуна з ідеальним ППП

За рахунок поступового збільшення напруги можливо повністю видалити стартові коливання електромагнітного моменту та обмежити пусковий струм.

Видно, що графік моменту подібний до параболи. Якщо використати зворотну функцію для завдання напруги, то можна отримати близьке до лінійного зростання моменту (рис. 2.3) та відповідне зменшення часу пуску.

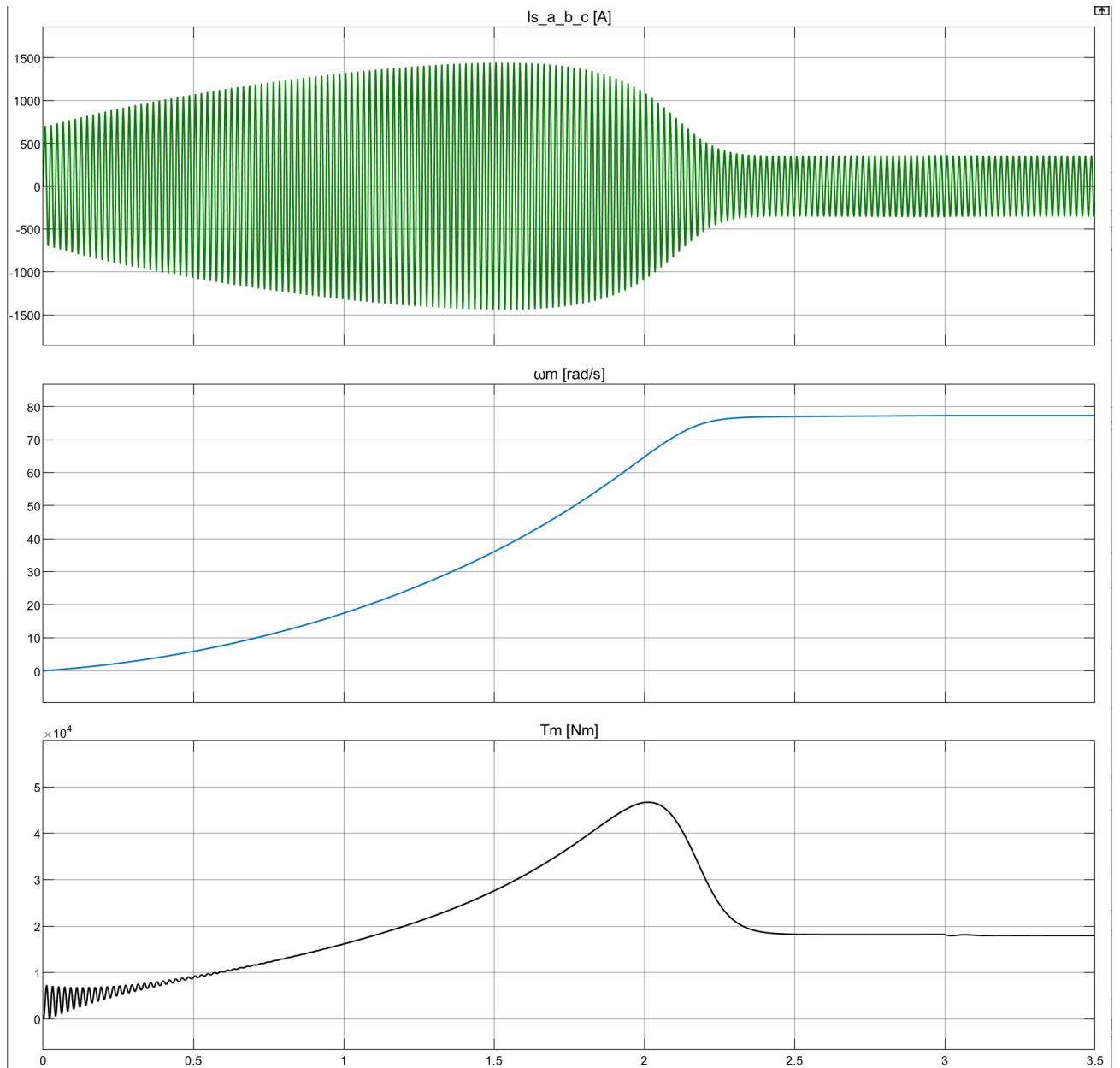


Рисунок 2.3. – Пуск асинхронного двигуна при $U_{set} = \sqrt{0.1 + 0.3t}$, $U_{set} \leq 1$

Будемо далі використовувати рис. 2.2 та 2.3 в якості еталонних.

2.2 Моделювання тиристорного перетворювача напруги

Тиристорний перетворювач напруги (ТПН) інакше називають за його призначенням в механізмах, як «пристрій плавного пуску – ППП» або англійською – «софтстартер».

Для моделювання цього пристрою необхідно використати електронні компоненти Thyristor з бібліотеки Matlab/Simulink/SimPowerSystem та додаткові елементи з груп керування та вимірювання.

Шість тиристорів, які виконують роль відсікання напруги синусоїди для живлення АД, представляють собою напівпровідниковий елемент, котрий може відкритися за допомогою сигналу затвору. Модель тиристора, яку зображено на схемі нижче, моделюється за допомогою резистору R_{on} , індуктивності L_{on} та джерела живлення постійного струму V_f , підключених послідовно з перемикачем. Перемикач керується логічним сигналом в залежності від напруги V_{ak} , струму I_{ak} та сигналу затвору g .

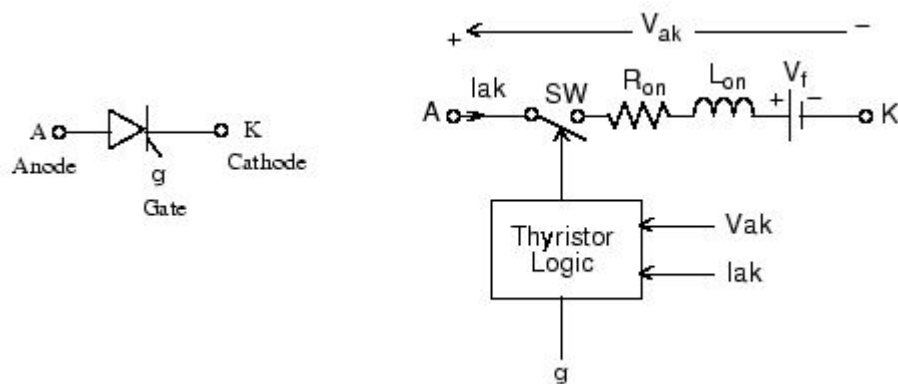


Рис. 2.4. – Модель тиристор

Синхронний 6-ти імпульсний генератор (рис. 2.5) використовується для відкривання шести тиристорів перетворювача. Вихідним сигналом блоку є вектор з 6-ти імпульсів, котрі окремо синхронізовані на тиристорних

потенціалах. Ці імпульси генеруються зі зсувом на альфа градусів після переходу фазної напруги через нуль.

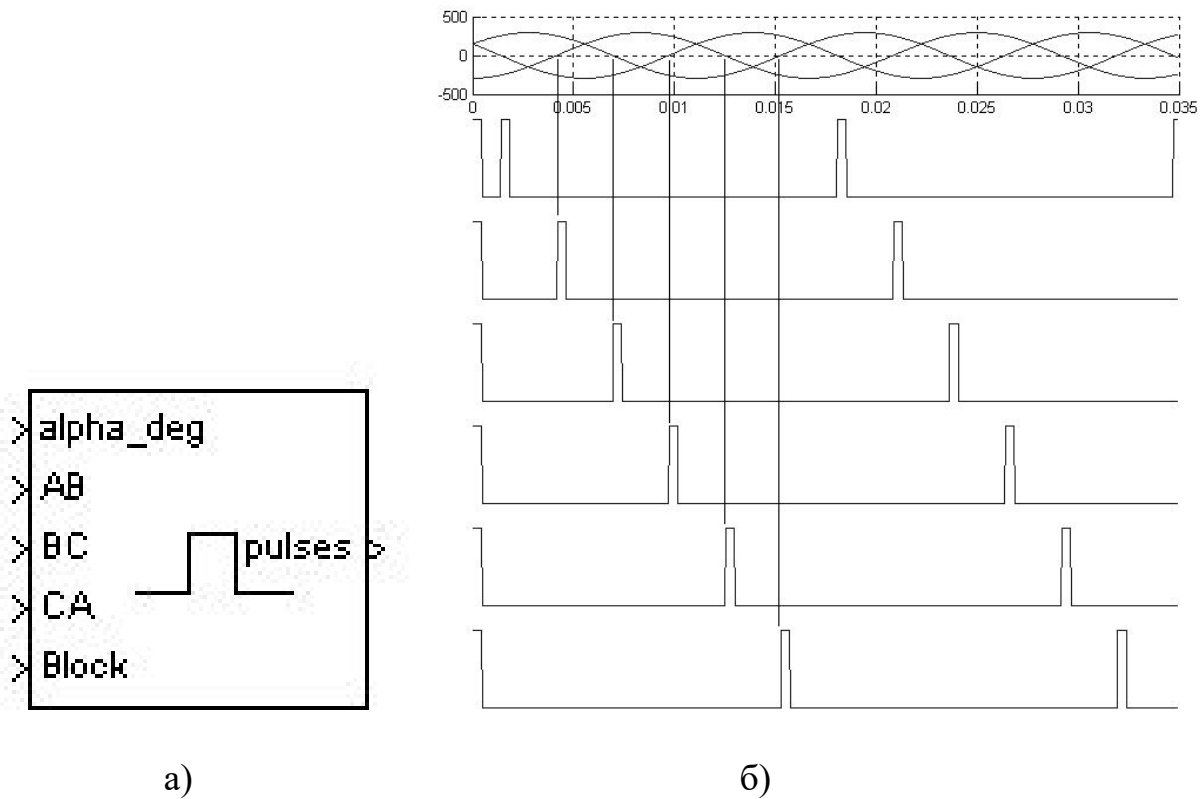


Рисунок 2.5. – 6-пульсний генератор (а) та вектор імпульсів відпирання тиристорів (б)

Для коректної роботи генератору серед його параметрів задається частота мережі живлення та ширина імпульсу, яка в ТПН не може бути меншою за максимальний кут зсуву між струмом та напругою фази. Тому вектор імпульсів 6-пульсного генератор подається на тиристори через блок логічних елементів, які додатково захищають тиристори від подачі імпульсів керування за межами необхідного півперіоду (рис. 2.6).

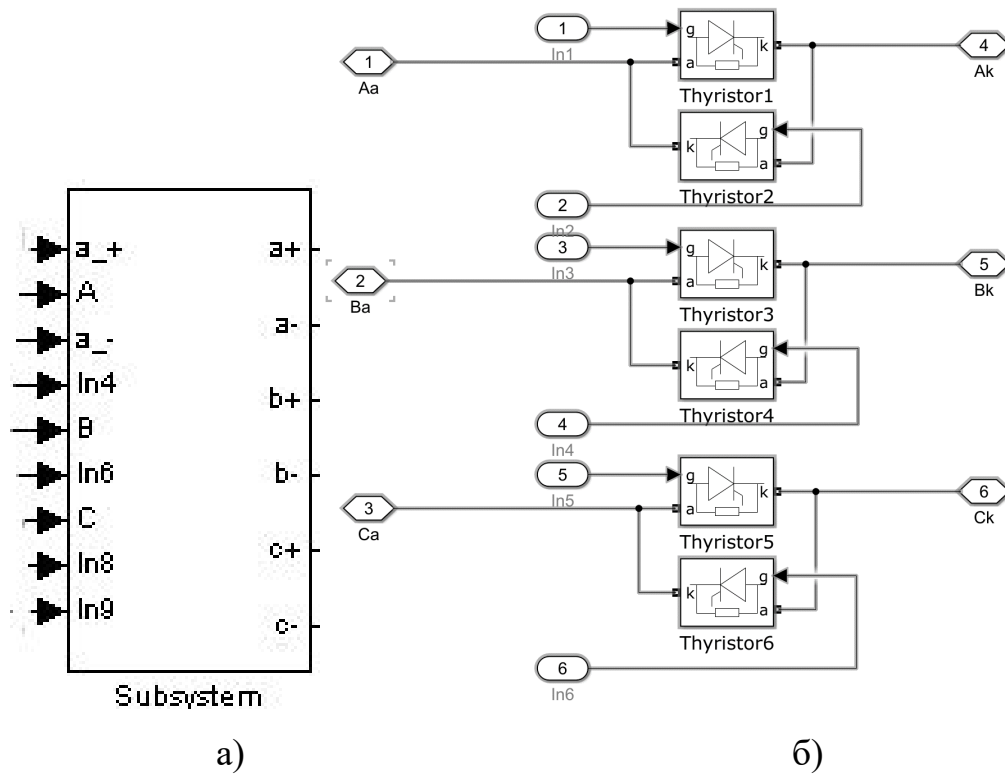


Рисунок 2.6. – Блок логічних елементів (а) та блок тиристорів нереверсивного ТПН (б)

В результаті з'єднань компонентів отримаємо модель ТПН (рис. 2.7).

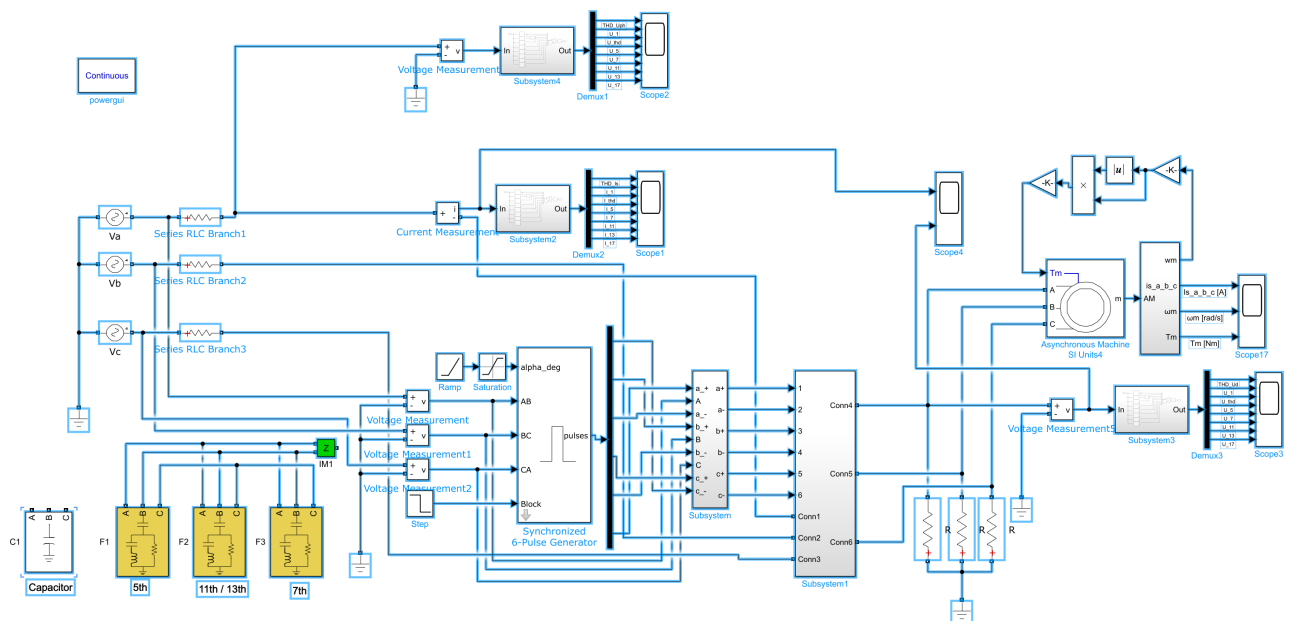


Рисунок 2.7. – Модель тиристорного перетворювача напруги

Аналогічно ідеальному ППП розрахуємо перехідні процеси при лінійному зростанні напруги (рис. 2.8).

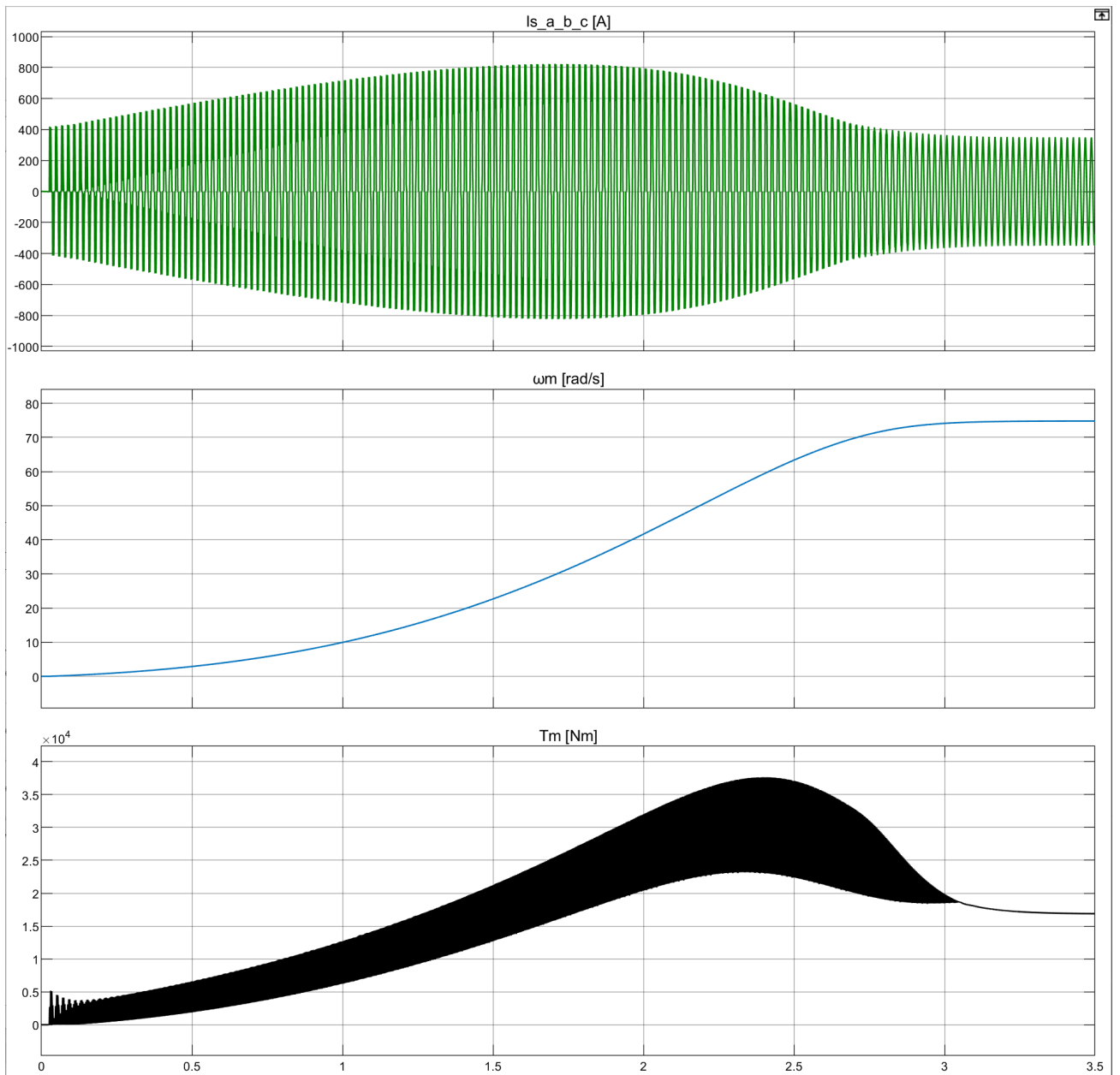


Рисунок 2.8. – Графіки перехідних процесів в ТПН при лінійному зростанні напруги

Цей перехідний процес відрізняється від еталонного – на графіку моменту високочастотні (300 Hz) коливання, але найважливіше, що амплітуда моменту

менша, ніж при еталонному процесі. Це пояснюється тим, що негативними рисами тиристорного перетворювача напруги є викривлення форми напруги і, насамперед, струму від синусоїдальної (рис. 2.9). Це стає причиною шуму на графіку моменту; призводить до появи високочастотних непарних гармонік, не кратних 3, як в сигналах струму, так і напруги на обкладинках двигуна та в мережі, що пов'язано з її обмеженою потужністю; зменшує амплітуду 1-ї гармоніки напруги, що впливає на величину максимально можливого моменту.

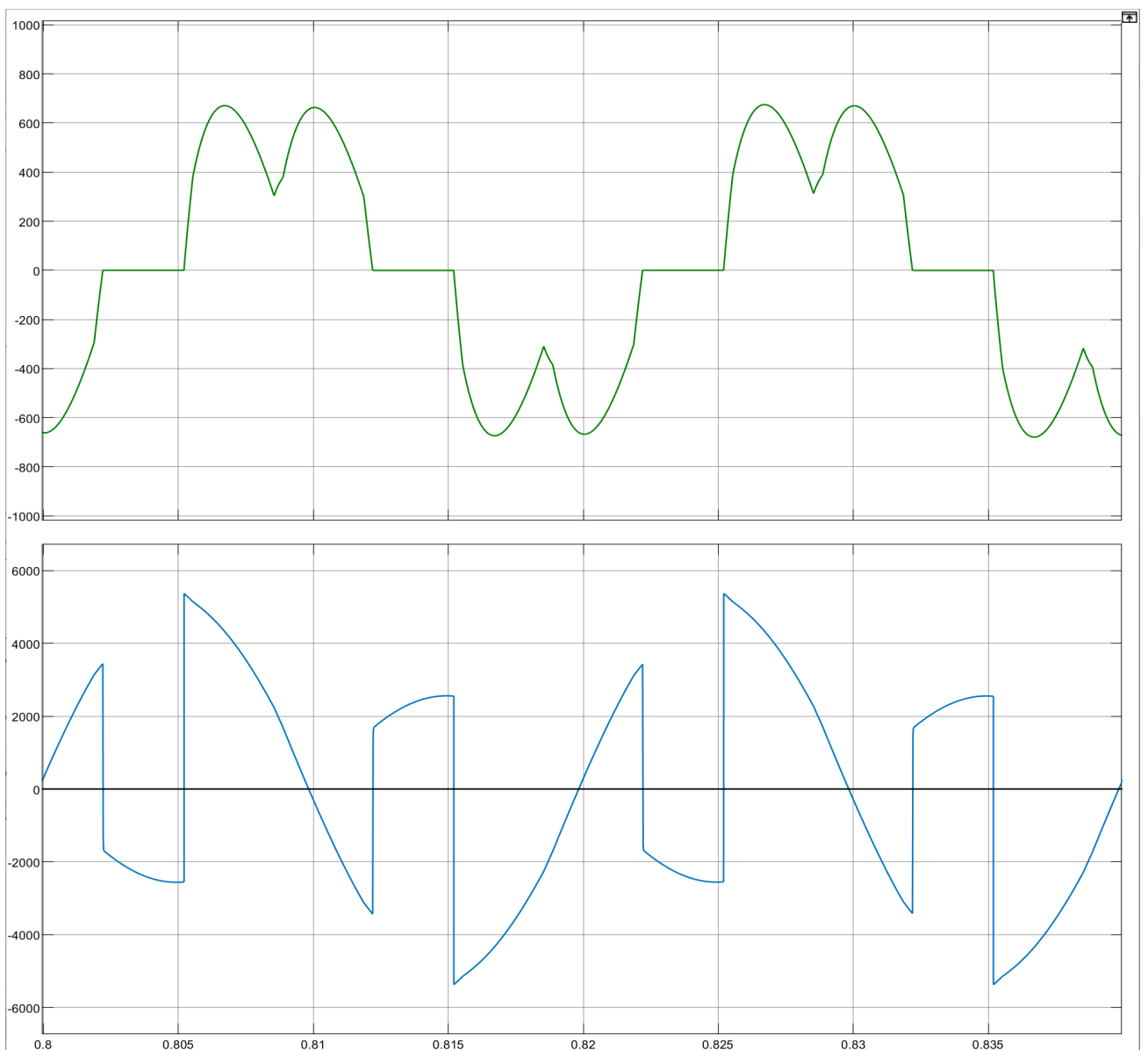


Рисунок 2.9. – Струм і напруга фази статора в ТПН

Це відображається і на основних електроенергетичних показниках, графіки яких наведено нижче.

Для розрахунку основних показників – THD за струмом і напругою на двигуні та на шині мережі живлення, основних гармонічних сигналів, які впливають на перешкоди в мережі та шум і перегрів двигуна – створимо підсистему, яку наведено на рис. 2.10.

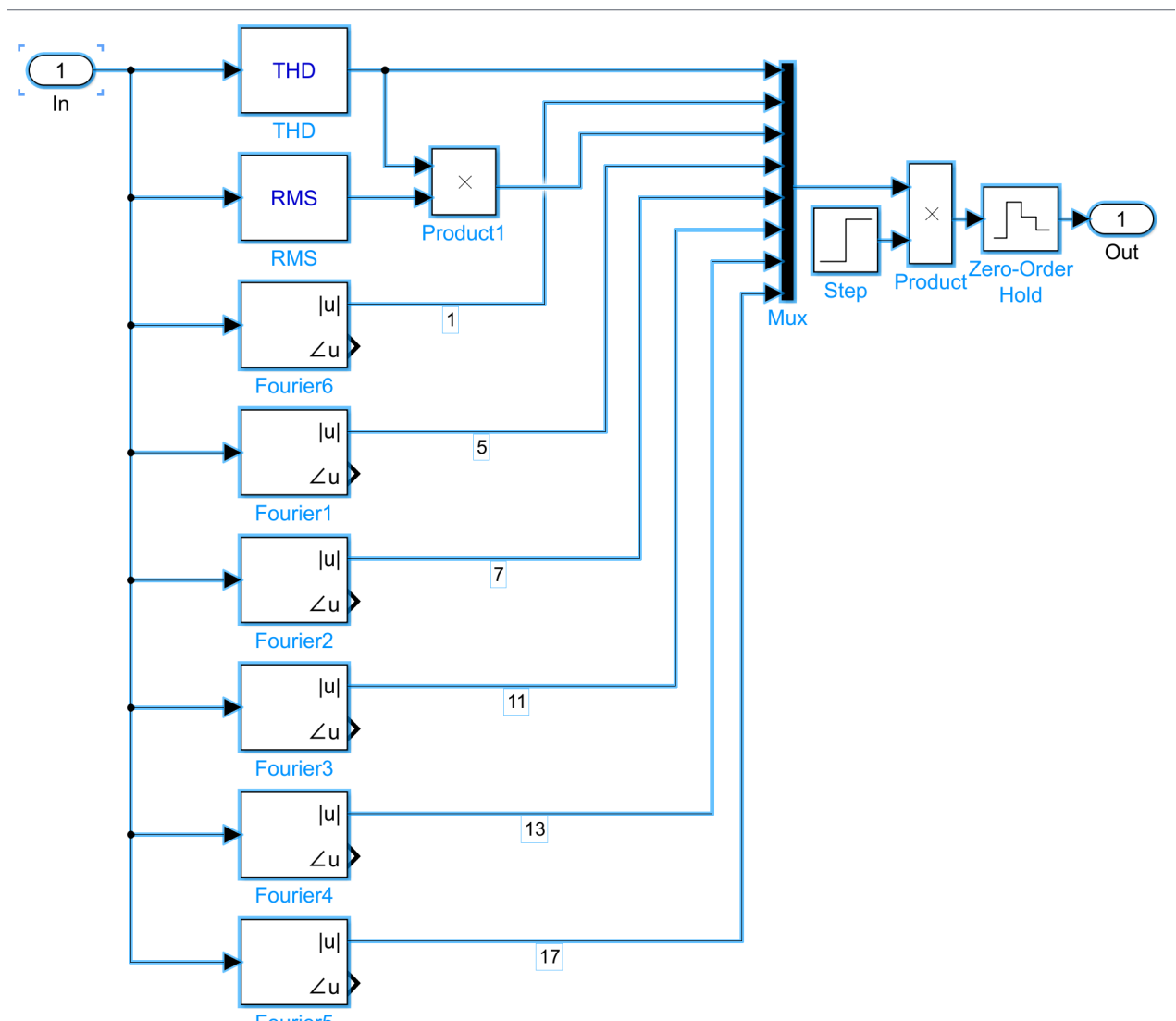


Рисунок 2.10. – Підсистема розрахунку основних енергетичних та якісних показників

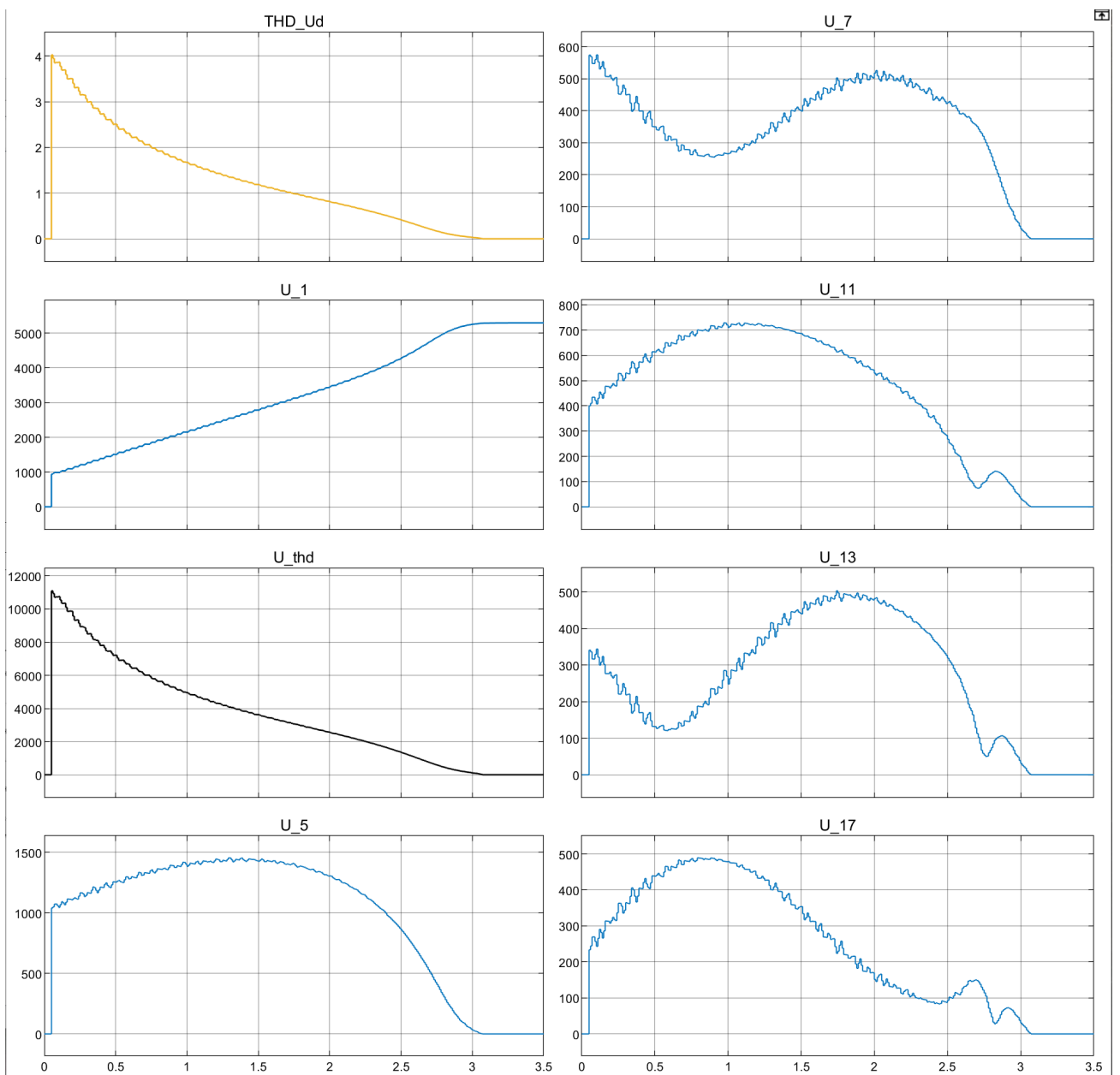


Рисунок 2.11. – Показники напруги фази статора

THD за напругою на двигуні на початку процесу становить більше 400 %, абсолютне сумарне значення спотворення напруги складає близько 1100 V (рис. 2.11), за струмом THD перевищує 55 %, сумарне значення спотворення складає близько 140 A (рис. 2.12).

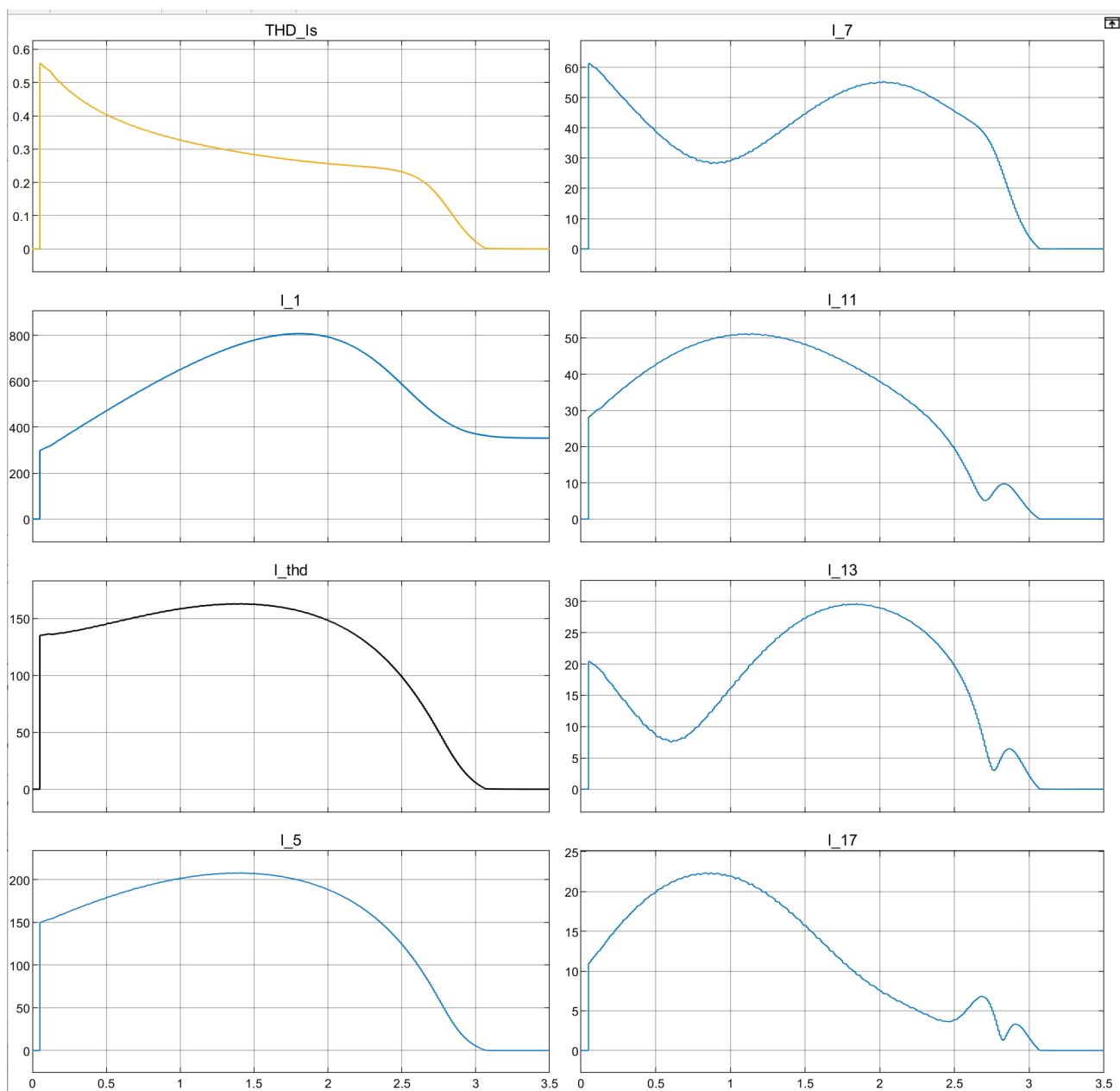


Рисунок 2.12. – Показники струму фази статора

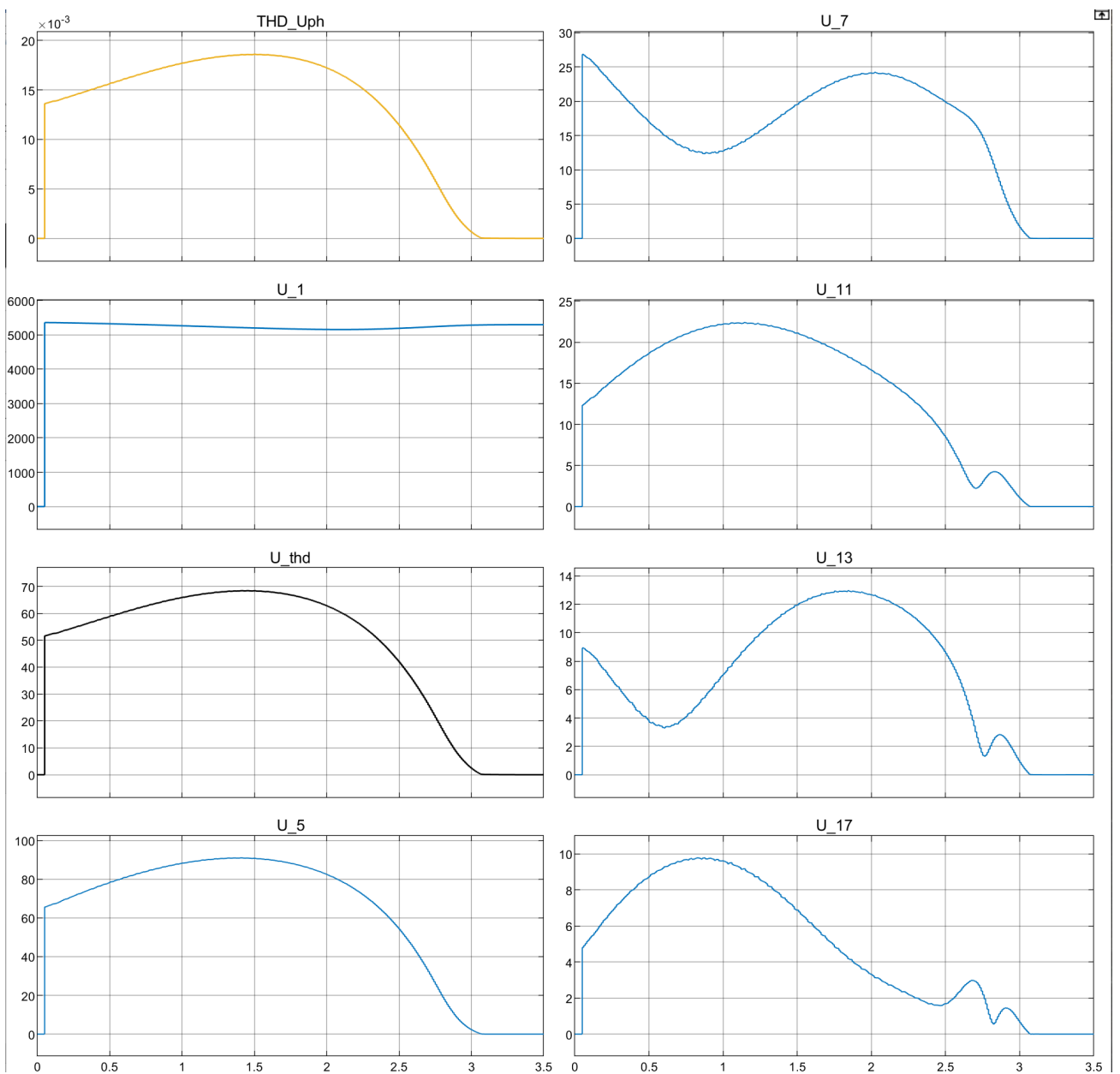


Рисунок 2.13. – Показники напруги фази мережі при роботі ТПН

Важливо відмітити, що амплітуда вищих гармонік суттєво змінюється під час перехідного процесу, що ускладнює вибір фільтрів вищих гармонік – необхідно враховувати максимальні значення продовж перехідного процесу [5, 6].

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ І СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРУ ПЛАВНОГО ПУСКУ З ПОВНІСТЮ КЕРОВАНИМИ ТИРИСТОРАМИ (GTO)

Gate turn-off thyristor (GTO) – це особливий тип тиристора, який являє собою потужний напівпровідниковий прилад. Його винайшла компанія General Electric [10]. GTO, на відміну від звичайних тиристорів, є повністю керованими перемикачами, які можна вмикати та вимикати за допомогою третього електроду – затвора.

Звичайні тиристори (випрямлячі, керовані кремнієм) не є повністю керованими перемикачами ("повністю керований перемикач" можна вмикати і вимикати за бажанням). Тиристори можна ввімкнути лише за допомогою проводу затвора, але не можна вимкнути за допомогою проводу затвора. Тиристори вмикаються за допомогою сигналу затвора, але навіть після того, як сигнал затвора знято (вилучено), тиристор залишається у включеному стані, доки не виникне умова вимкнення (який може бути прикладенням зворотної напруги до клеми, або зменшення прямого струму нижче певного порогового значення, відомого як «струм утримання»). Таким чином, тиристор поводить себе як звичайний напівпровідниковий діод після його включення або «запуску».

GTO може бути ввімкнено за допомогою сигналу затвора, а також може бути вимкнено за допомогою сигналу затвора негативної полярності.

Включення здійснюється за допомогою імпульсу «позитивного струму» між клемми затвора і катода. Оскільки затвор-катод веде себе як PN-перехід, між клемми буде відносно невелика напруга. Явище включення в GTO, однак, не таке надійне, як SCR (тиристор), і малий позитивний струм затвора повинен підтримуватися навіть після включення для підвищення надійності.

Вимкнення здійснюється за допомогою імпульсу «негативної напруги» між клемми затвора і катода. Частина прямого струму (приблизно від однієї третини

до однієї п'ятої) «вкрадена» і використовується для індукування напруги катод-затвор, що, у свою чергу, спричиняє падіння прямого струму, і GTO вимкнеться (перехід до стану «блокування»).

Тиристори GTO страждають від тривалого часу вимкнення, в результаті чого після падіння прямого струму виникає довгий час, коли залишковий струм продовжує текти, поки не буде знято весь заряд, що залишився з пристрою. Це обмежує максимальну частоту перемикання приблизно до 1 кГц. Однак можна відзначити, що час вимкнення GTO приблизно в десять разів швидше, ніж у порівнянного напівкерованого тиристор (Табл. 3.1) [11]. Для полегшення процесу вимкнення тиристори GTO зазвичай виготовляються з великої кількості (сотень або тисяч) малих тиристорних елементів, з'єднаних паралельно.

Таблиця 3.1. Порівняння SCR і GTO одного класу

Характеристики	Опис	Тиристор (1600 В, 350 А)	GTO (1600 В, 350 А)
VT ON	падіння напруги у стані ON	1,5 В	3,4 В
ton, Igon	Час увімкнення, струм затвора	8 мкс, 200 мА	2 мкс, 2 А
toff	Час вимкнення	150 мкс	15 мкс

На відміну від біполярного транзистора з ізольованим затвором (IGBT), тиристор GTO потребує зовнішніх пристроїв ("демпферних ланцюгів") для формування струмів увімкнення та вимкнення, щоб запобігти руйнуванню пристрою.

Під час увімкнення пристрій має максимальний показник dI/dt , що обмежує зростання струму. Це потрібно для того, щоб вся частина пристрою ввімкнулася до досягнення повного струму. Якщо цей номінальний параметр буде перевищений, область пристрою, найближча до контактів затвора, перегріється і розплавиться від перевантаження струму. Швидкість dI/dt зазвичай контролюється шляхом додавання реактора насичення (демпфера включення), хоча dI/dt включення є менш серйозним обмеженням для тиристорів GTO, ніж для звичайних тиристорів.

Розробимо модель пристрою плавного пуску з використанням GTO в декілька етапів.

3.1. Модель софтстартера з ідеальними ключами

Для формування керуючих імпульсів необхідно звернути увагу на те, що необхідно отримати вихідну напругу, максимально наближену до синусоїдальної. А джерелом вже виступає синусоїдальна напруга мережі. Тому достатньо трикутний опорний сигнал, який синхронізований з відповідною фазною напругою та має одиничну амплітуду, порівняти з постійним сигналом $0 \leq U_{set} \leq 1$. Також необхідно врахувати, що при позитивній напрузі фази необхідно вмикати умовно GTO з позитивним напрямом провідності, а при негативній – з протилежним напрямом. Тому

$$U_{gto} = Logic(U_{set} > U_{\Delta}) sign(U_{sin})$$

Далі в ідеалізованій моделі вихідна напруга реалізується множенням сигналу U_{gto} на модуль відповідної фазної напруги (рис. 3.1).

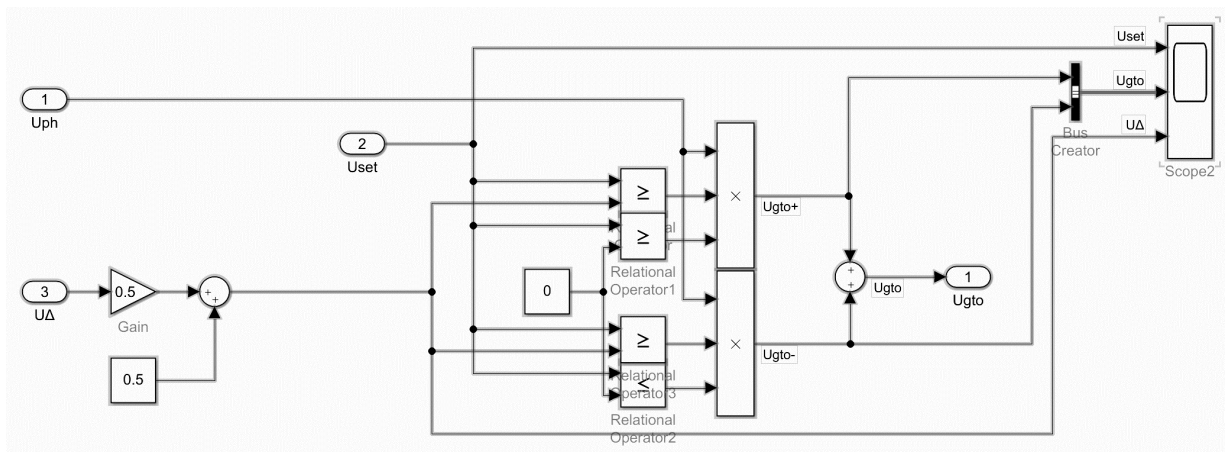


Рисунок 3.1. – Модель формування напруги в системі з ідеальними ключами

З такими блоками в кожній фазі отримуємо модель софтвера з ідеалізованими ключами (рис. 3.2)

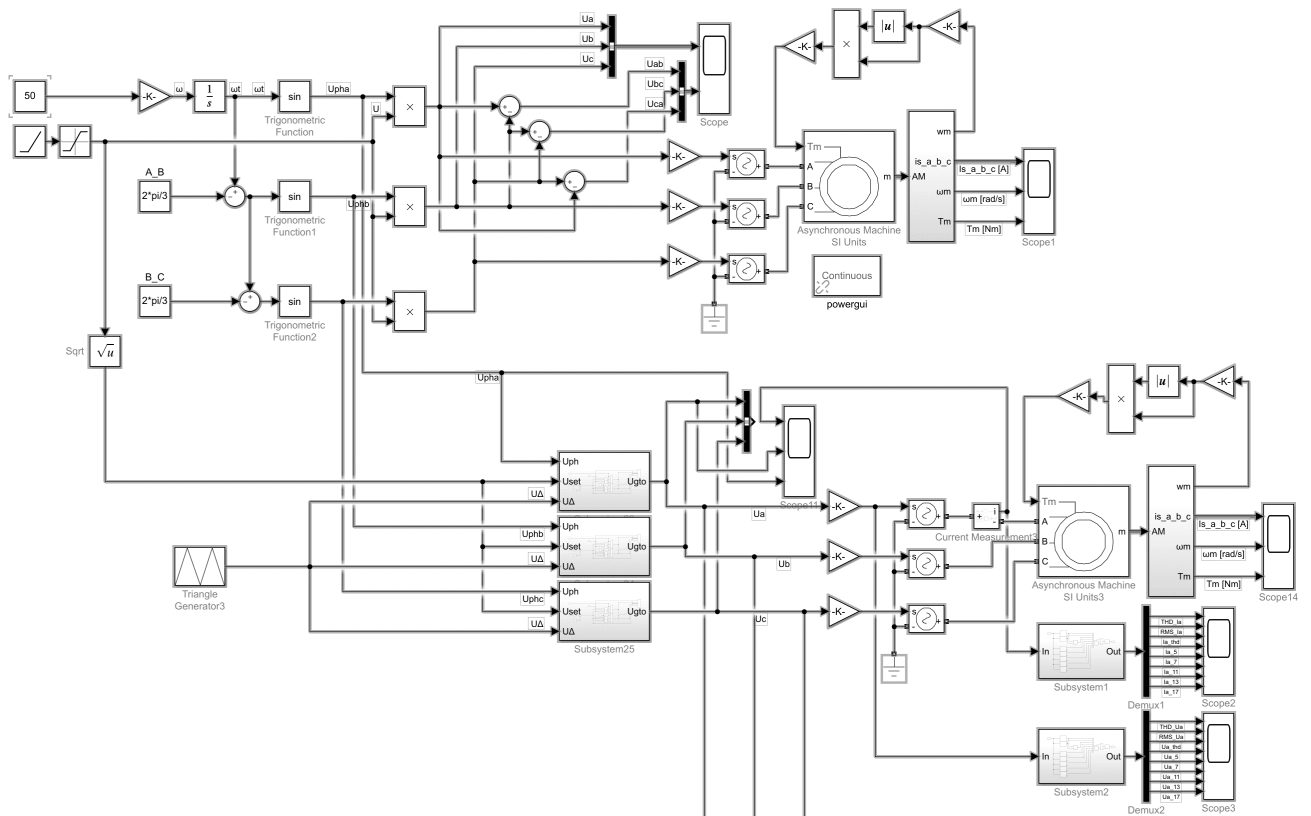


Рисунок 3.2. – Модель для порівняння ідеалізованого ППФ та софтвера з ідеальними ключами

Розрахуємо перехідні процеси в такому пристрої плавного пуску при частоті комутації тиристорів 750 Hz (на 25 % менше номінальної для серійних високовольтних GTO, що зменшує їх перегрів). На рис. 3.3 – 3.6 наведено деталізовані графіки напруги і струму в фазі статора

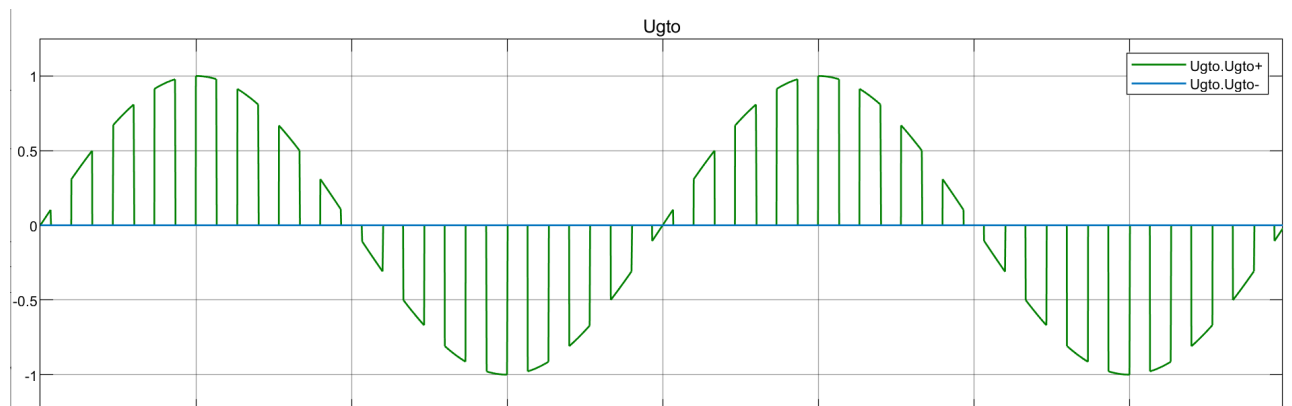


Рисунок 3.3. – Сигнали керування на початку роботи

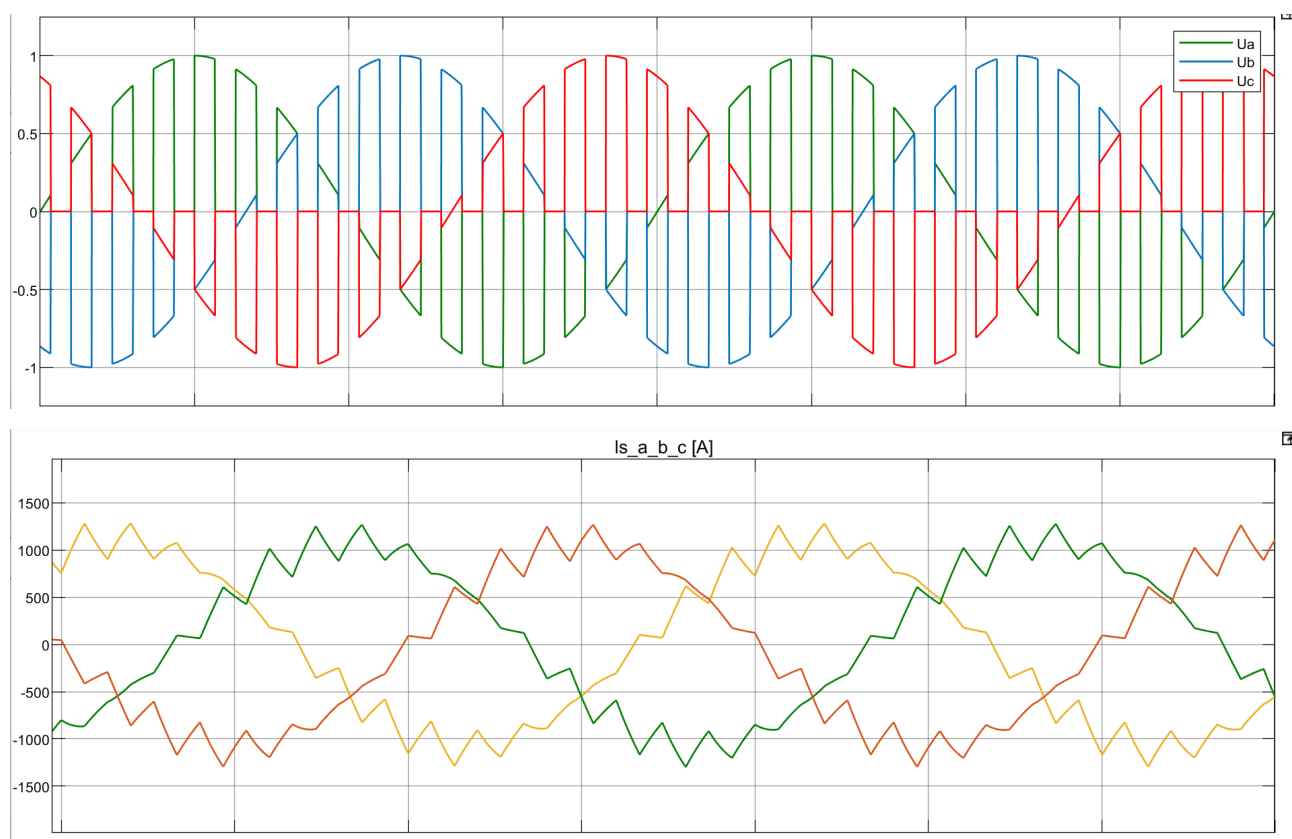


Рисунок 3.4. – Фазні напруги і струм на початку роботи

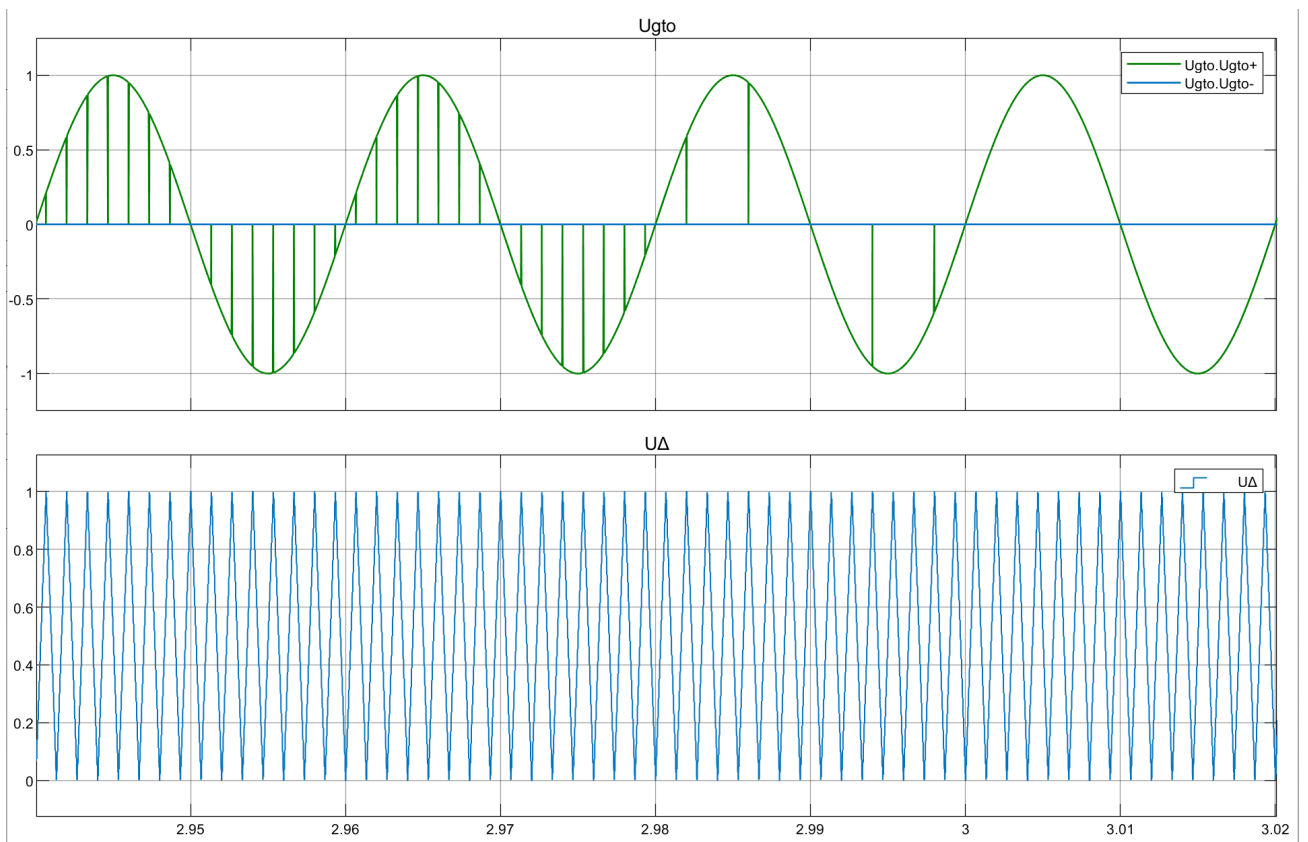


Рисунок 3.5. – Сигнали керування наприкінці роботи

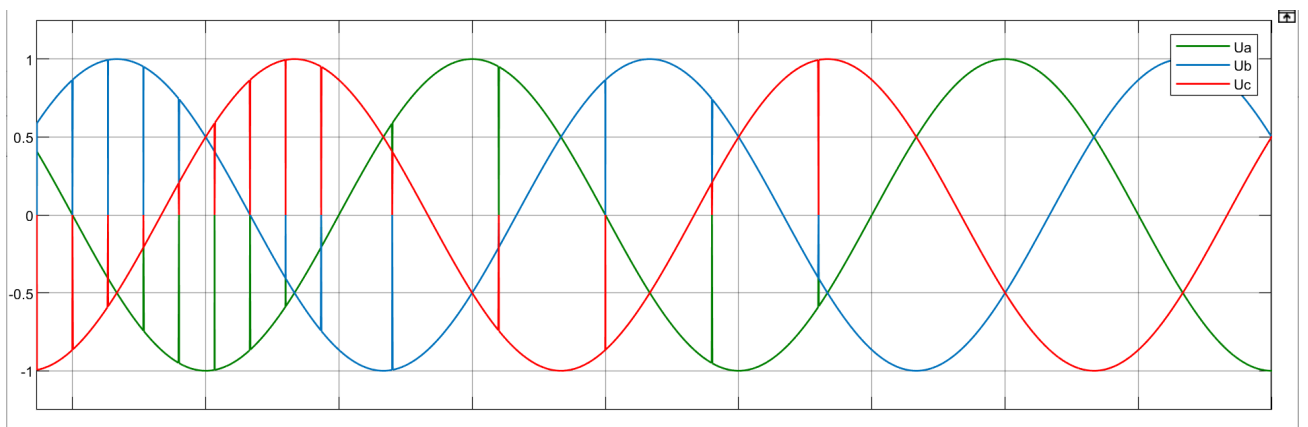


Рисунок 3.6. – Фазні напруги при виході на номінальну напругу

В результаті роботи системи отримаємо перехідні процеси в АД (рис. 3.7) за таких самих умов, як на рис. 2.3.

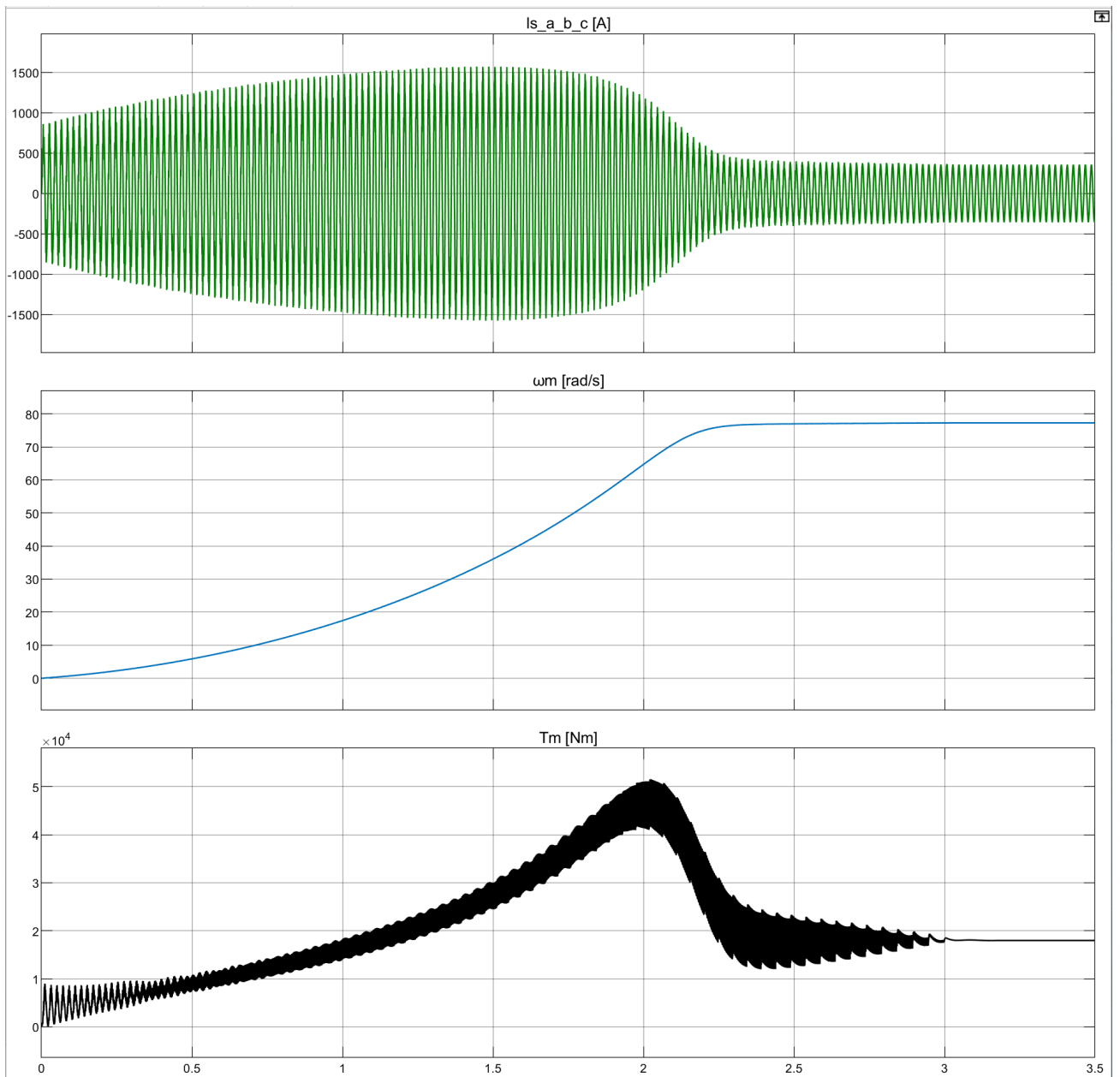


Рисунок 3.7. – Пуск асинхронного двигуна при $U_{set} = \sqrt{0.1 + 0.3t}$, $U_{set} \leq 1$

Бачимо, що крім високочастотних коливань моменту, за всіма іншими показниками перехідний процес не відрізняється від еталонного, на відміну від перехідного процесу з ТПН (див. рис. 2.8).

Основні електроенергетичні показники для струму і напруги двигуна наведено на рис. 3.8, 3.9.

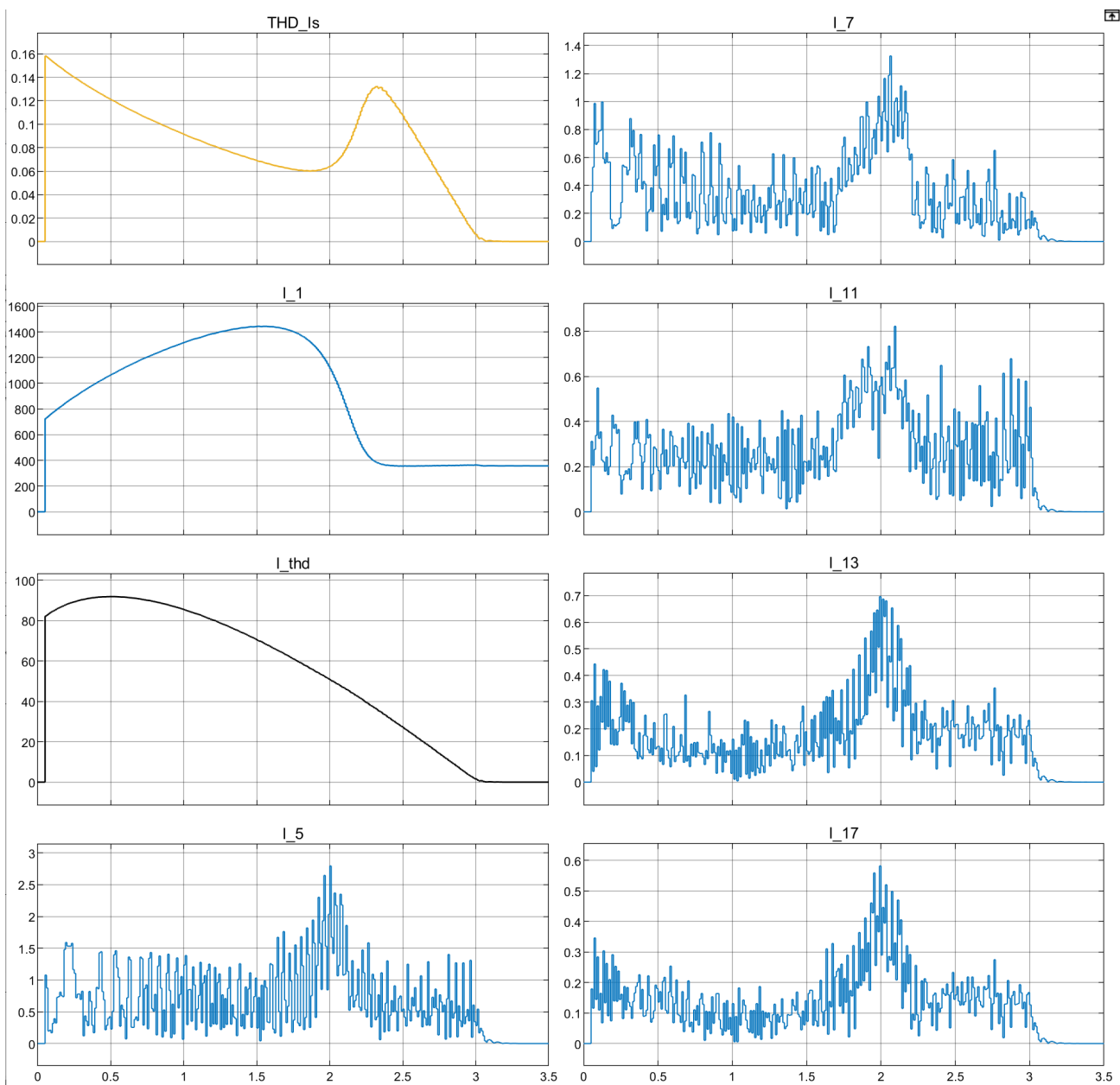


Рисунок 3.8. – Показники струму фази статора

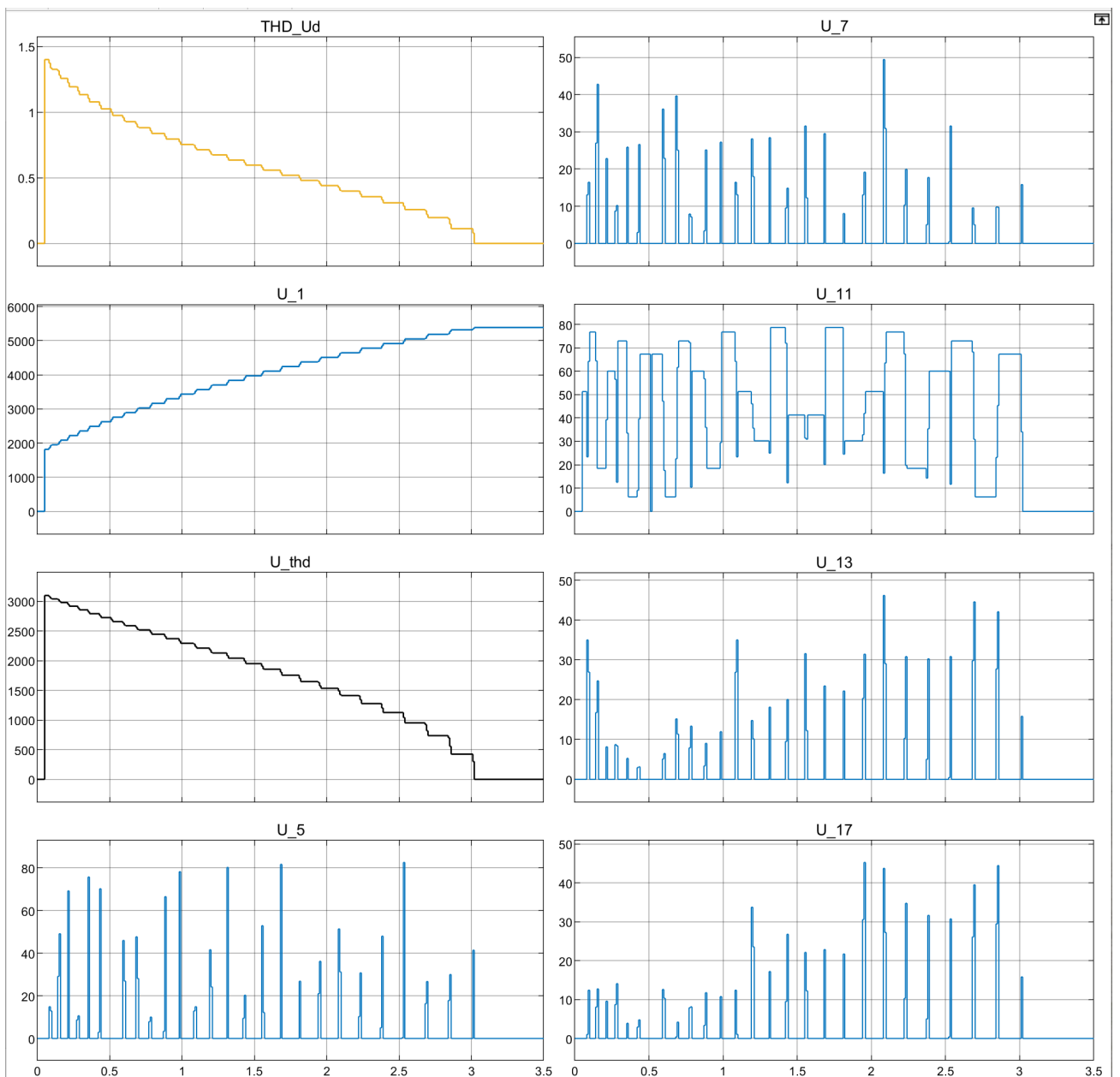


Рисунок 3.9. – Показники напруги фази статора

Перш за все, звертаємо увагу на THD за струмом – у 5 разів менше, ніж в ТПН, а THD за напругою на двигуні – у 4 рази менше, ніж в ТПН. Пристрій плавного пуску с GTO забезпечив точне зростання напруги за заданим законом, відповідно амплітуда 1-ї гармоніки струму більше, ніж в ТПН, що і призводить до більшого моменту та прискорення процесу пуску.

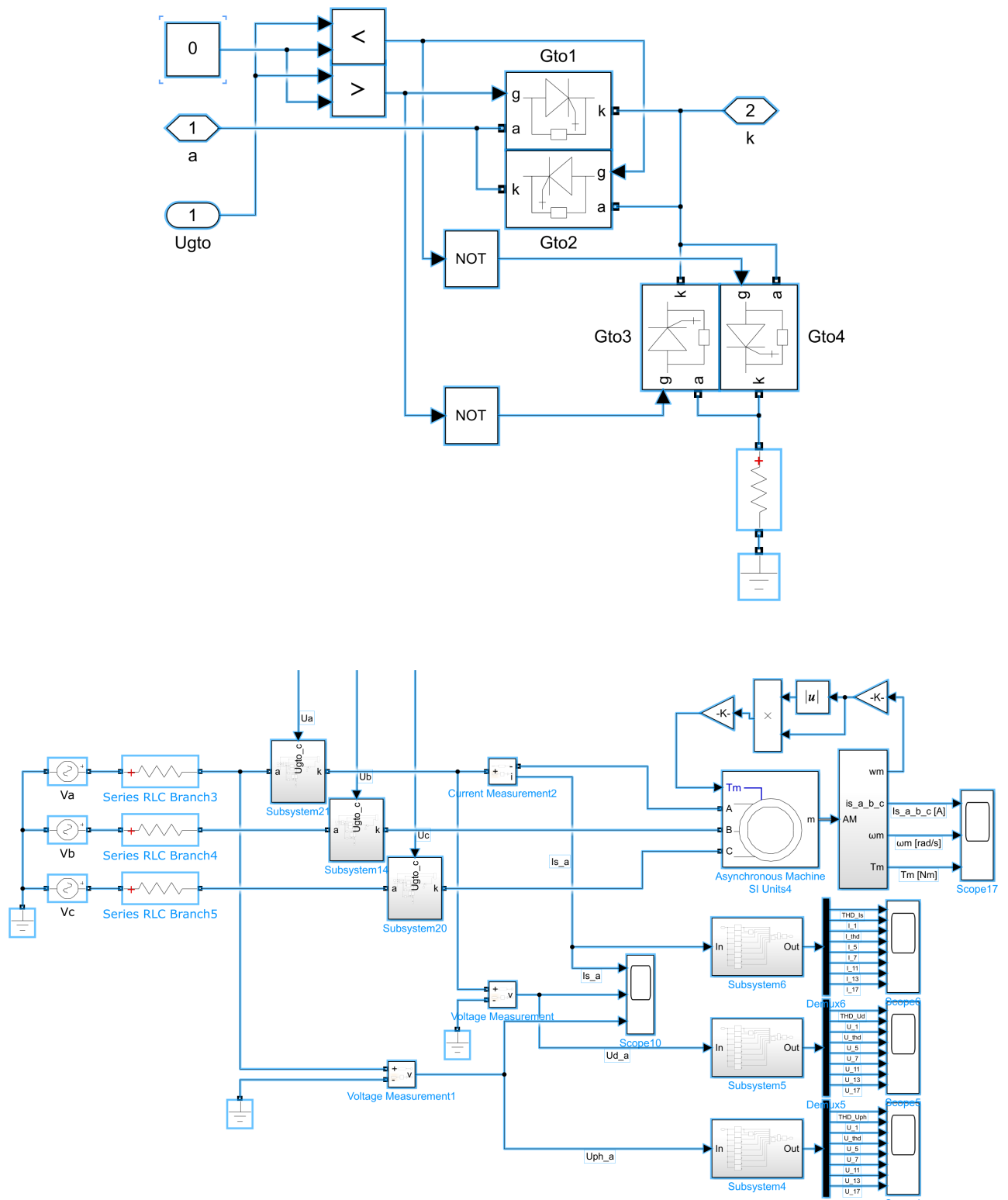
Таким чином, використання GTO може бути доцільним.

3.2 Моделювання пристрою плавного пуску з фізичними GTO

Необхідність моделювання софтстартера з фізичними GTO обумовлена тим, що при аналізі струмів ППП з ідеальними ключами виявляється важлива риса – так як всі трикутні сигнали спільні для всіх фаз, то відпирання і запирання GTO відбувається одночасно. При відпиранні навантаженням виступають фази двигуна, а джерелом – трифазна мережа. І якщо запирання тиристорів в ТПН відбувається природньо – незалежно від сигналу керування тиристор запирається, коли струм зменшується нижче струму утримання – то при запиранні GTO з реактивним навантаженням контур для струму повинен зникнути. Тому необхідно використати додатковий пристрій, який забезпечить існування струму під дією електрорушільної сили самоіндукції котушок двигуна в обхід GTO.

Для вирішення цієї проблеми можливі два рішення.

Перше – це така ж саме пара зустрічно-паралельних GTO (Gto3, Gto4 на рис. 3.10,а), підключених до нуля через резистор з деяким малим опором і працюючих в протифазі з основними GTO (Gto1, Gto2).



б)

Рисунок 3.10. – Модель силового блоку з додатковими GTO та модель ППП з фізичними GTO

Проведемо моделювання при частоті комутації 750 Hz (рис.311).

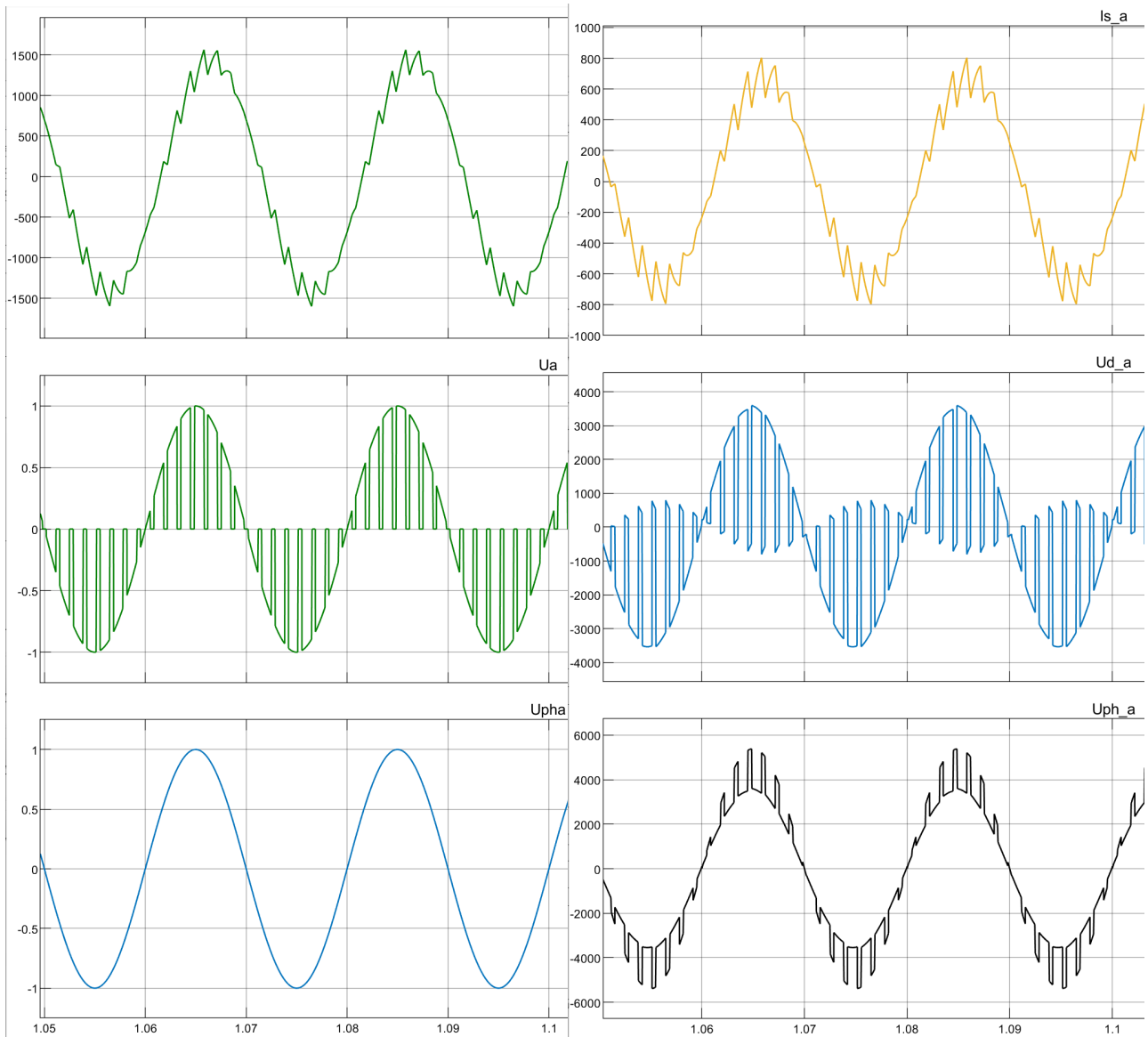


Рисунок 3.11. – Струм статора, напруга на двигуні, напруга в мережі живлення:
а) з ідеальними ключами, б) з GTO

На рис. 3.11 порівняно сигнали ідеального (а) та фізичного силового блоку. Видно, що шунтуючий резистор призводить до падіння напруги на двигуні на величину IR

для формування постійної складової електромагнітного моменту – величина RL_1 повинна бути співставною з періодом комутації тиристорів.

Саме тому отримано перехідні процеси (рис. 3.12), які мало відрізняються від перехідних процесів в ТПН.

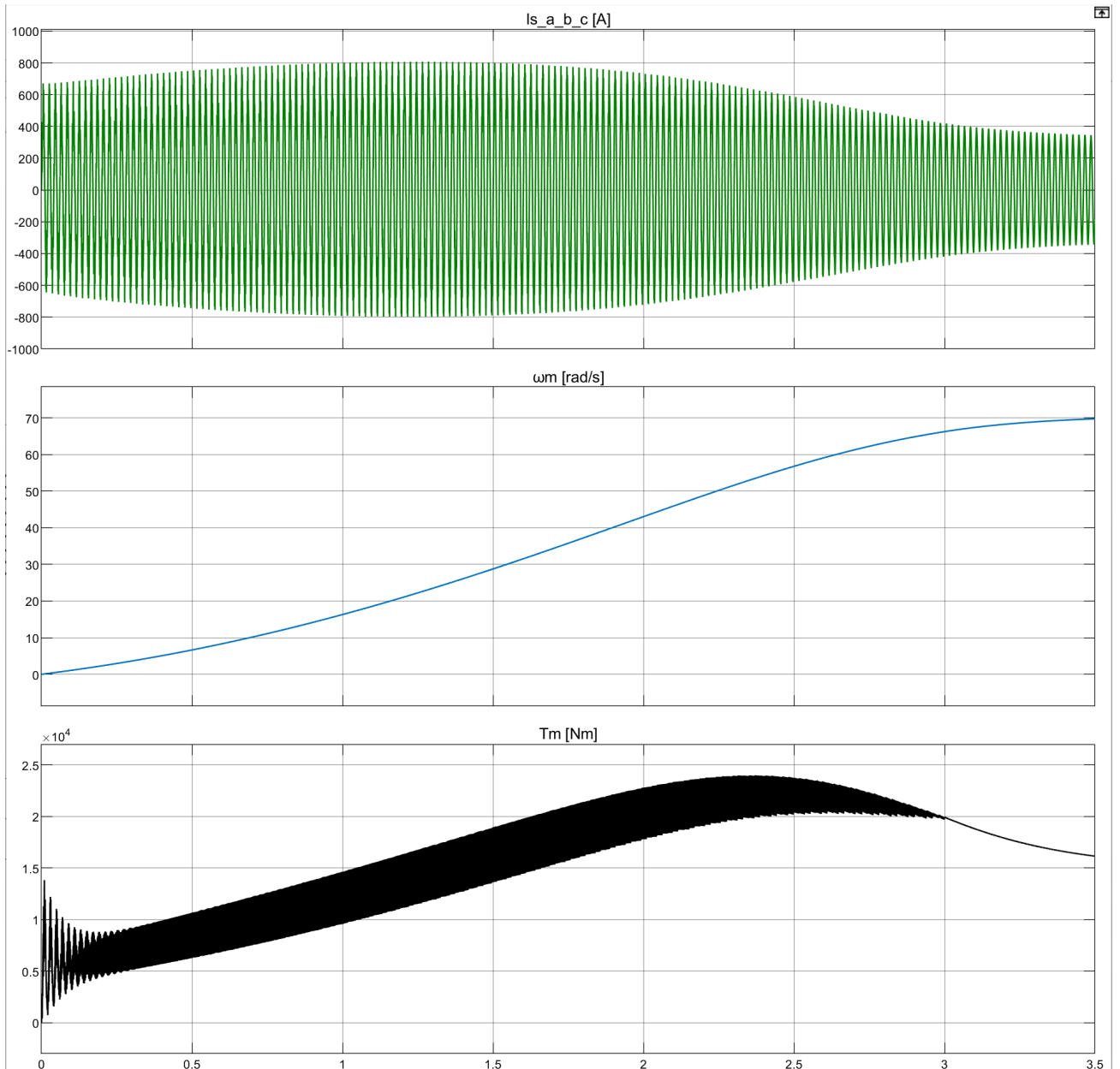


Рисунок 3.12. – Пуск асинхронного двигуна з фізичними GTO з шунтуючими GTO та $R = 1 \text{ Ohm}$

На рис. 3.13, 3.14 наведено THD та частотні показники за струмом та напругою фази двигуна.

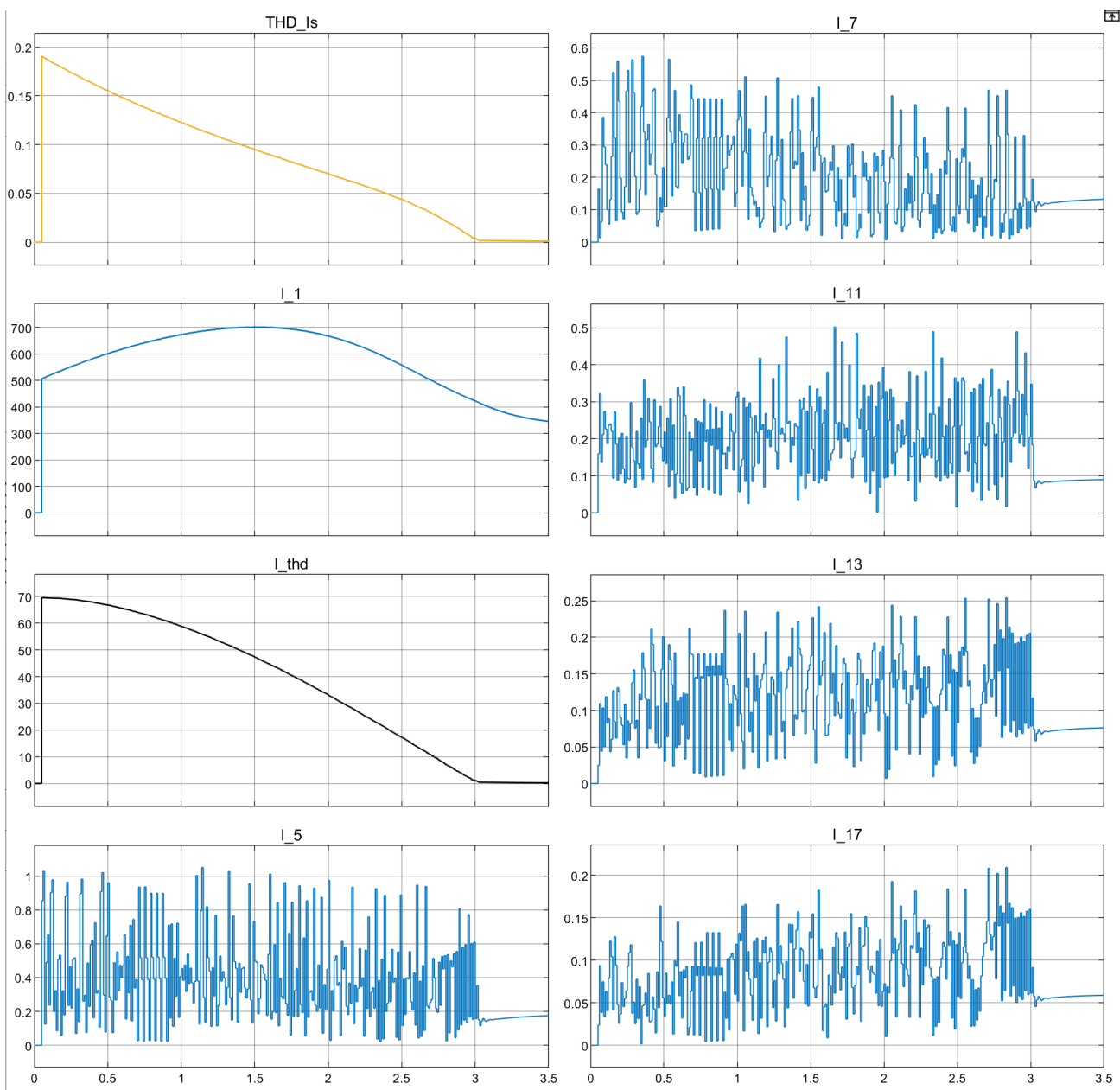


Рисунок 3.13. – Показники напруги фази статора

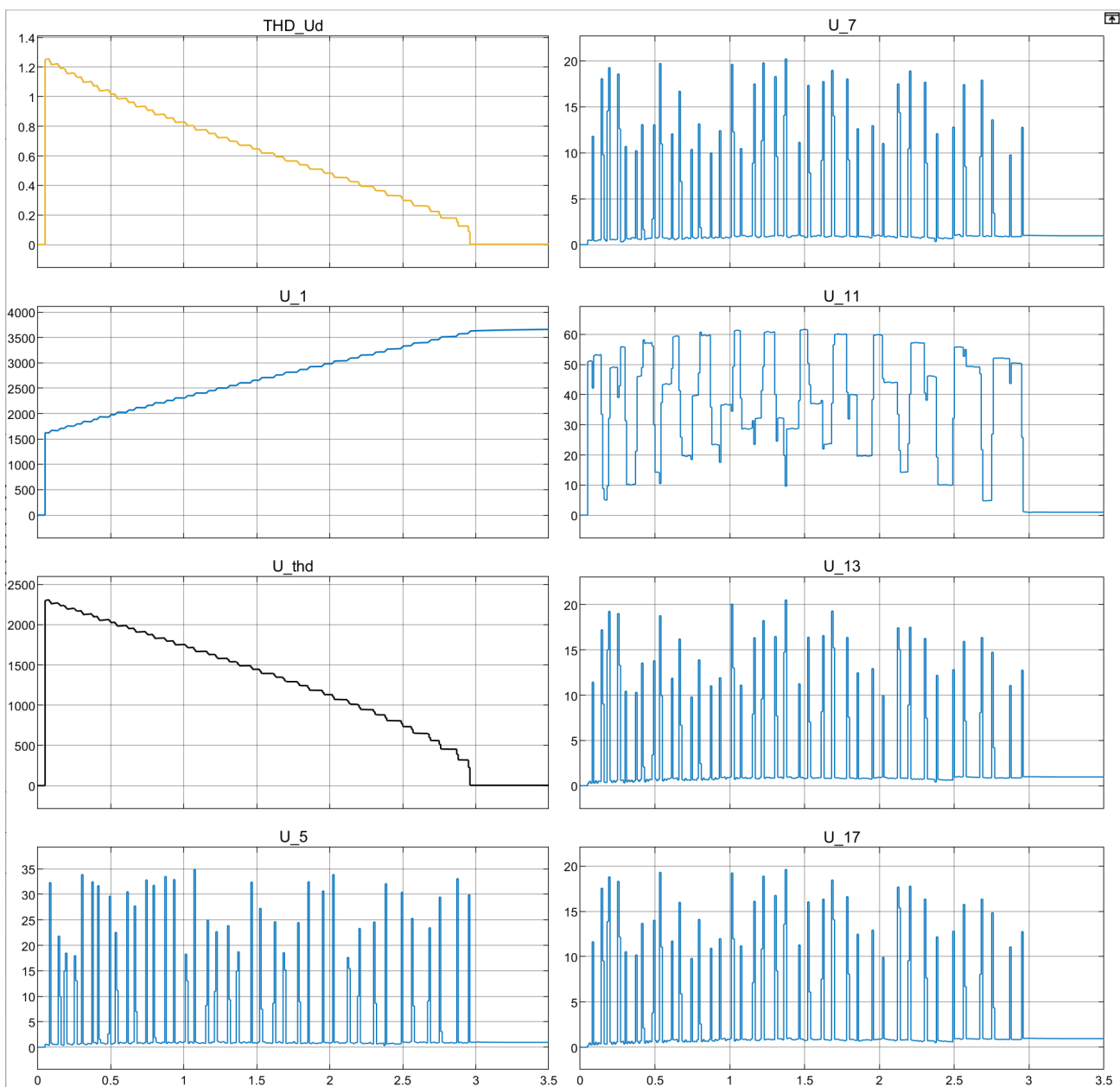


Рисунок 3.14. – Показники напруги фази статора

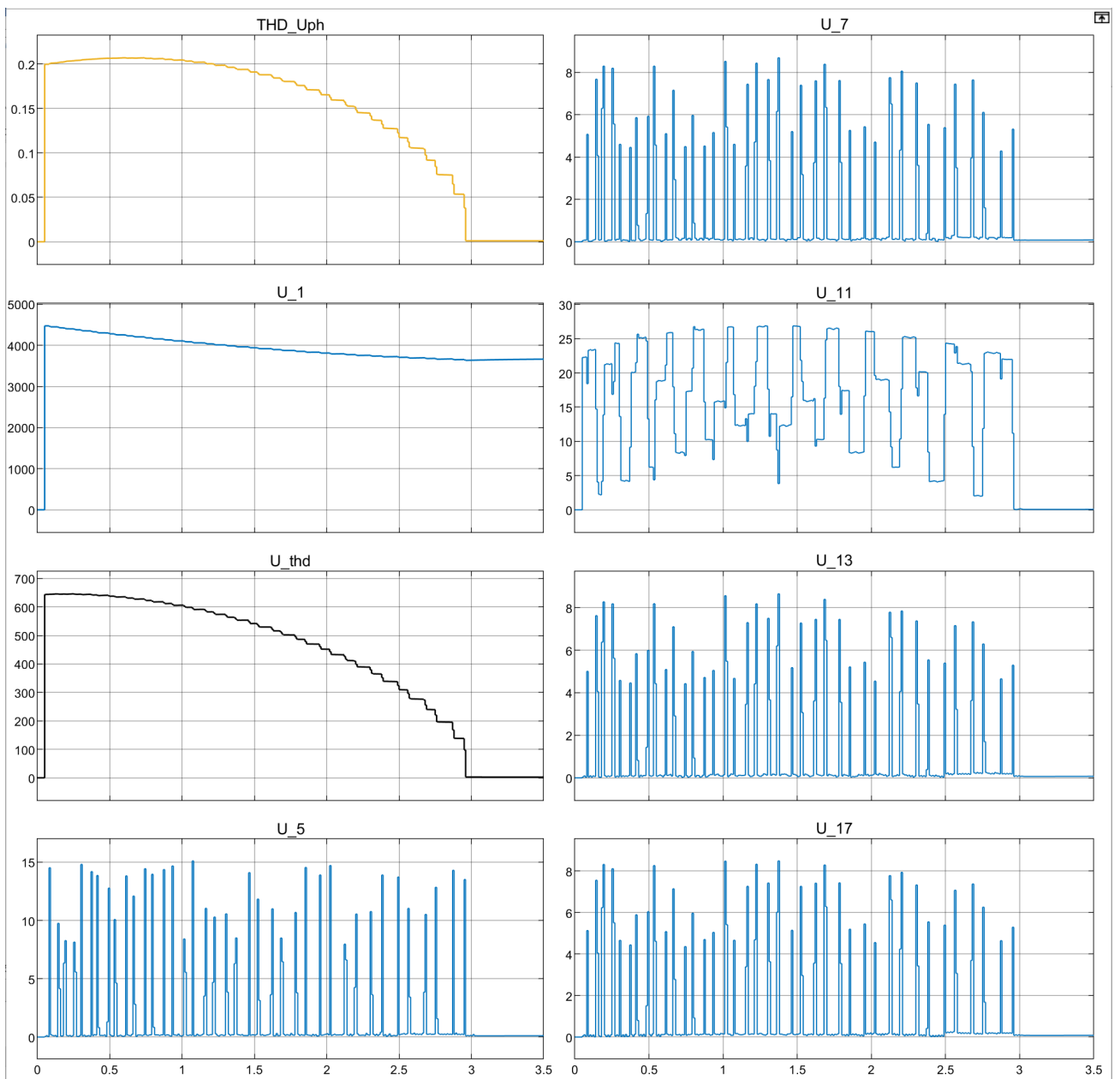


Рисунок 3.15. – Показники напруги фази мережі

Такий метод керування GTO забезпечив зменшення спотворень за струмом, але із-за падіння напруги на шунтуючому резисторі діюче значення напруги на фазі двигуна зменшується майже на 1000 V, що суттєво погіршує ККД софтверта.

Замість шунтуючого резистора з GTO також для створення контуру струму при запиранні тиристора можна використати конденсатор.

Схема силового модуля виглядає наступним чином (рис. 3.16).

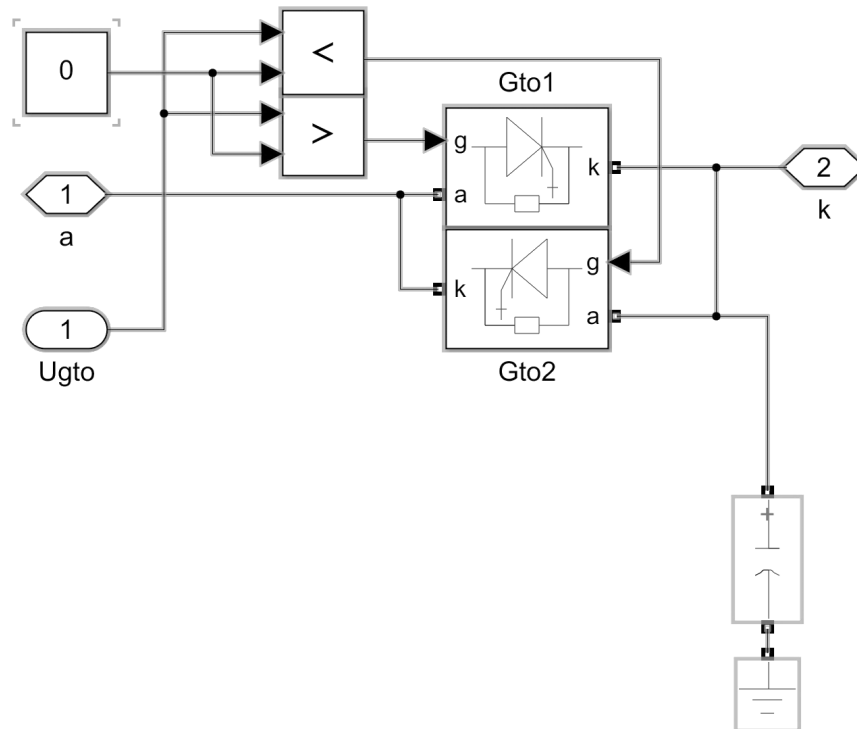
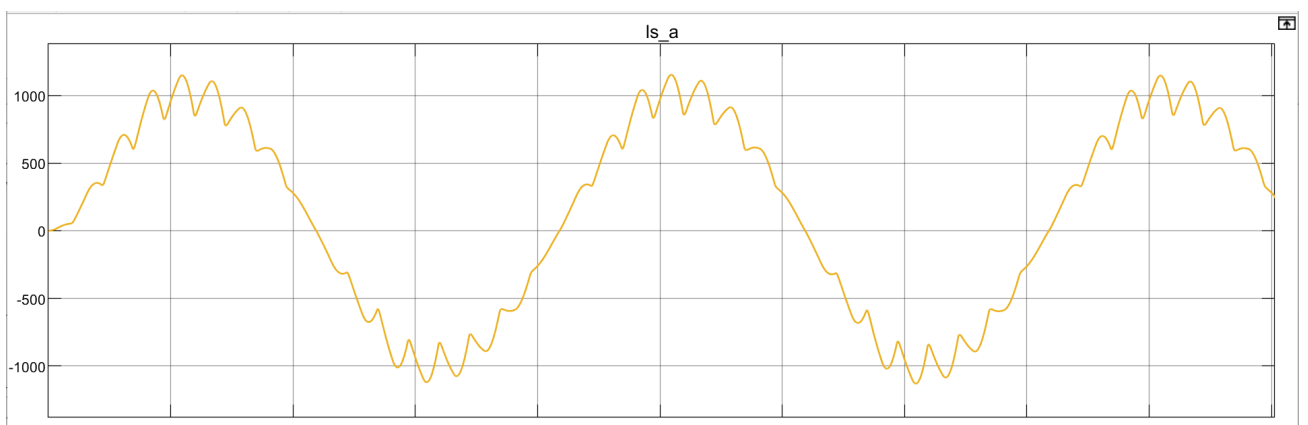


Рисунок 3.16. – Модель силового блоку GTO з конденсатором

Моделювання системи з таким блоком показало значно кращі результати (рис. 3.17 – 3.21).



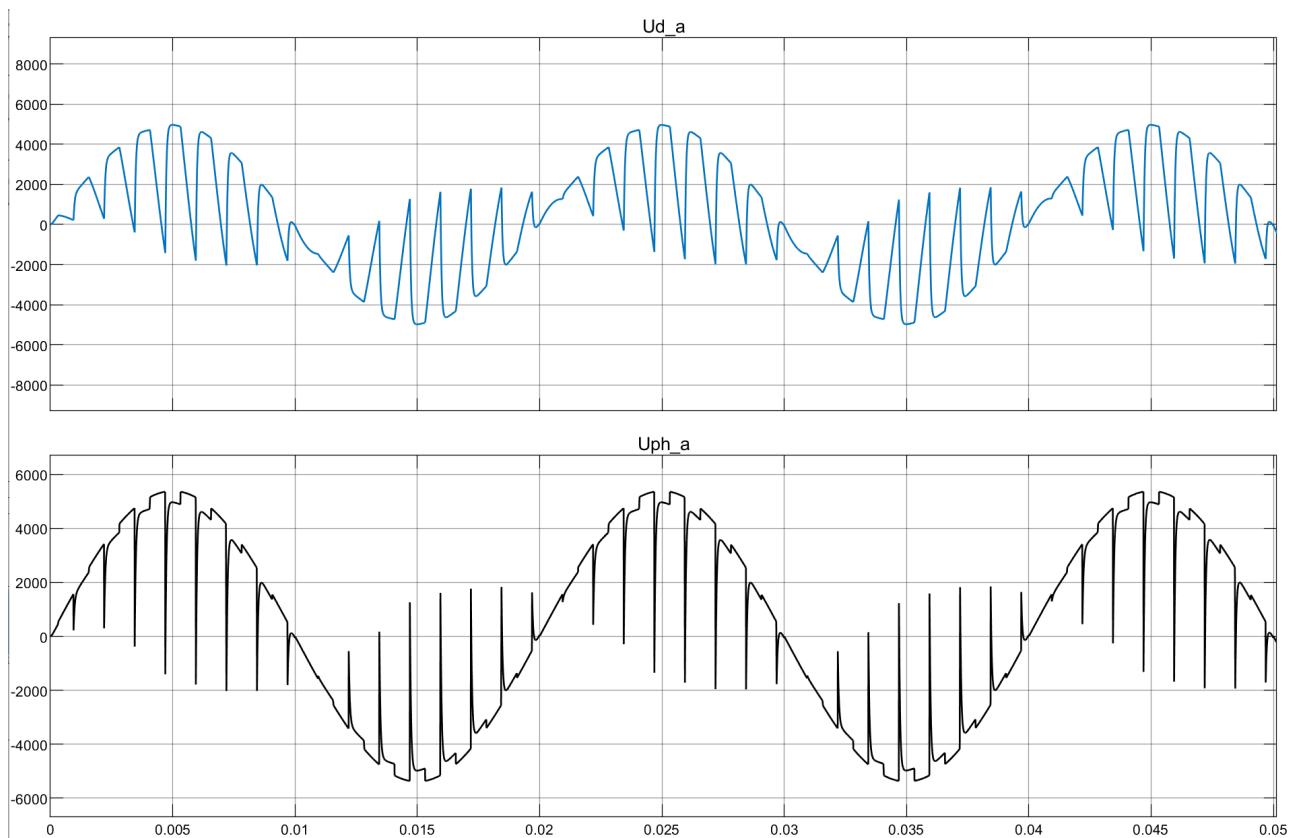


Рисунок 3.17. – Струм (а) та напруга фази статора і мережі (б) при використанні ГТО з конденсатором

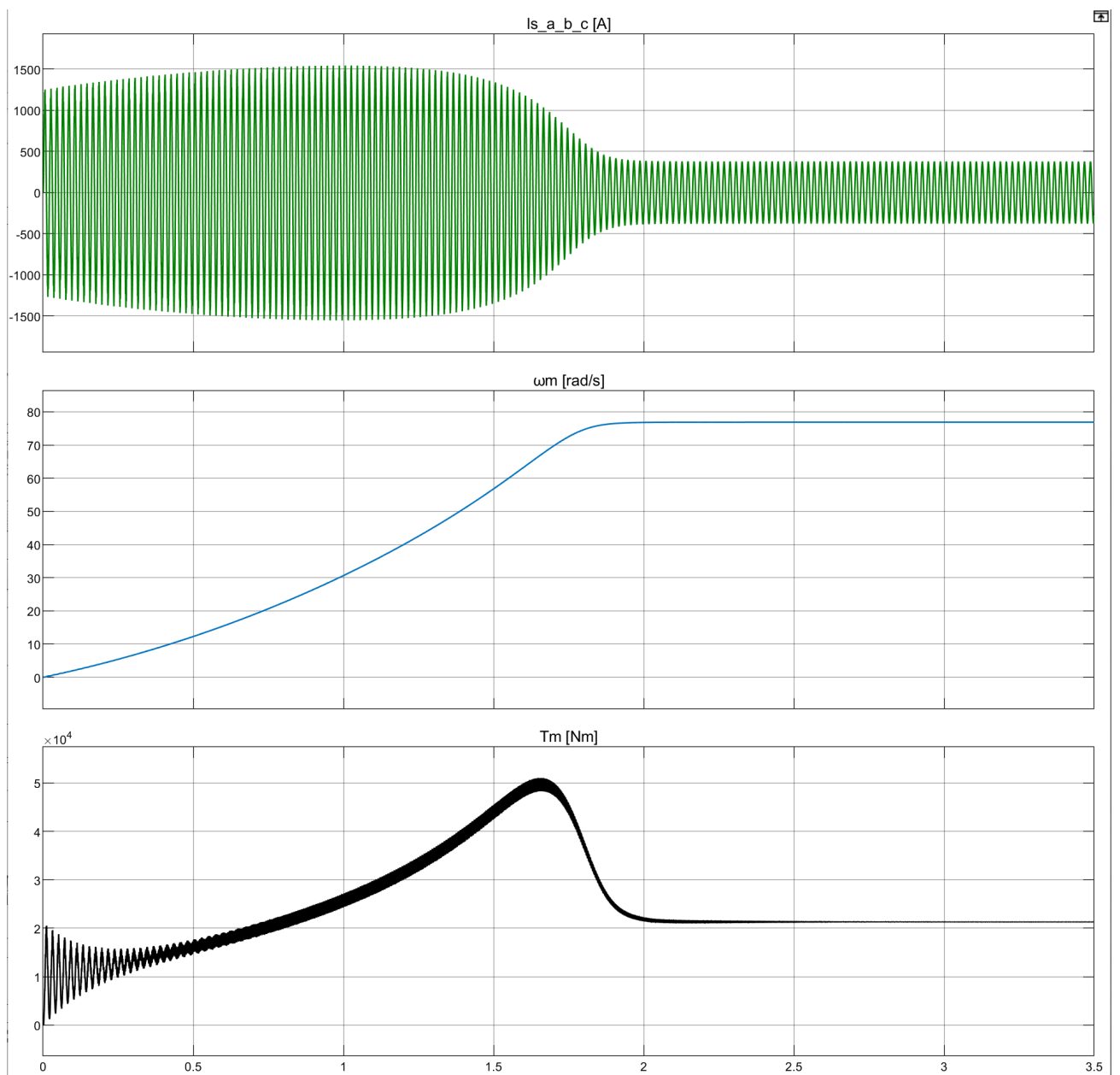


Рисунок 3.18. – Пуск асинхронного двигуна з фізичними GTO з $C = 200\mu F$

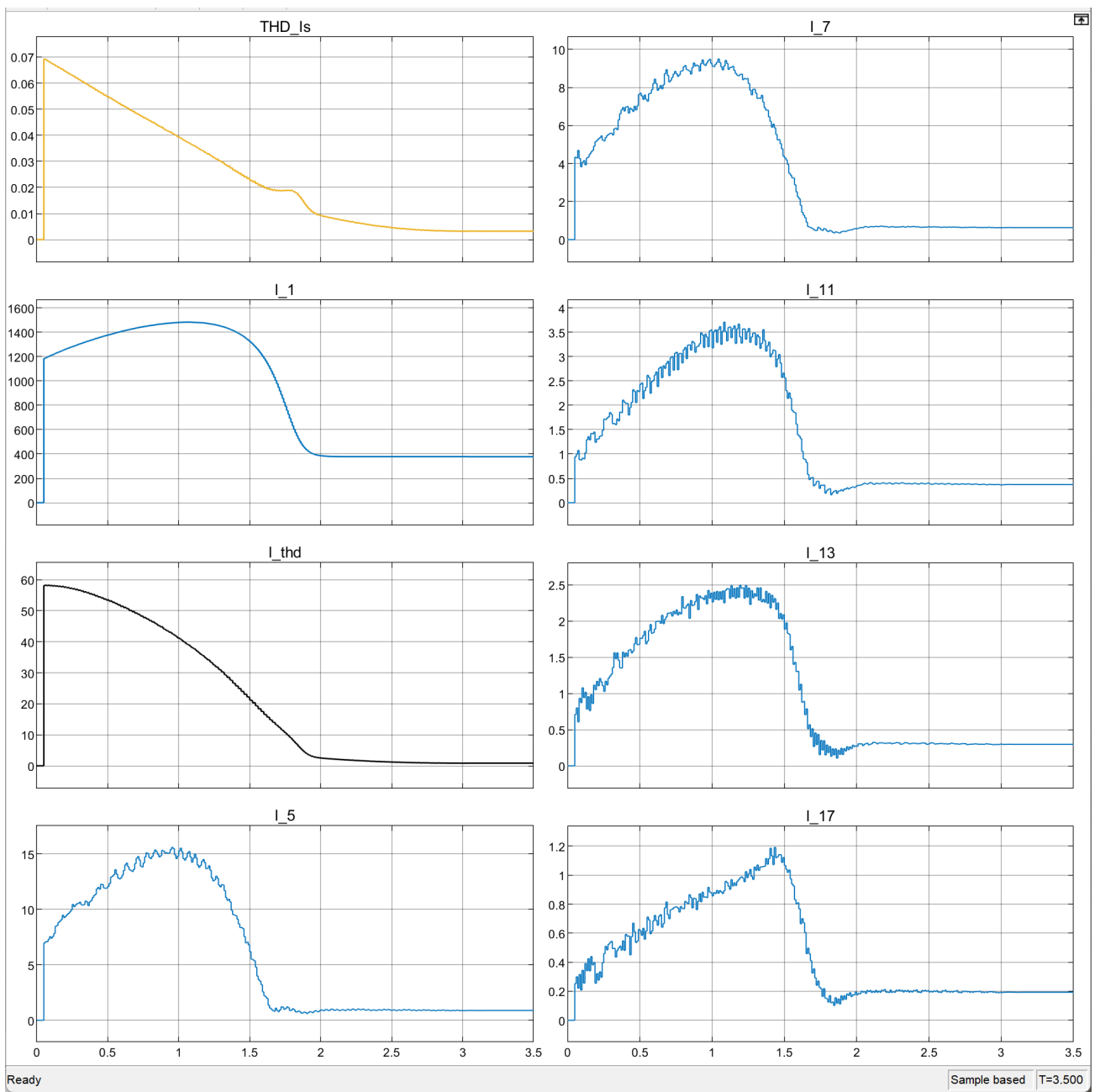


Рисунок 3.19. – Показники струму фази двигуна

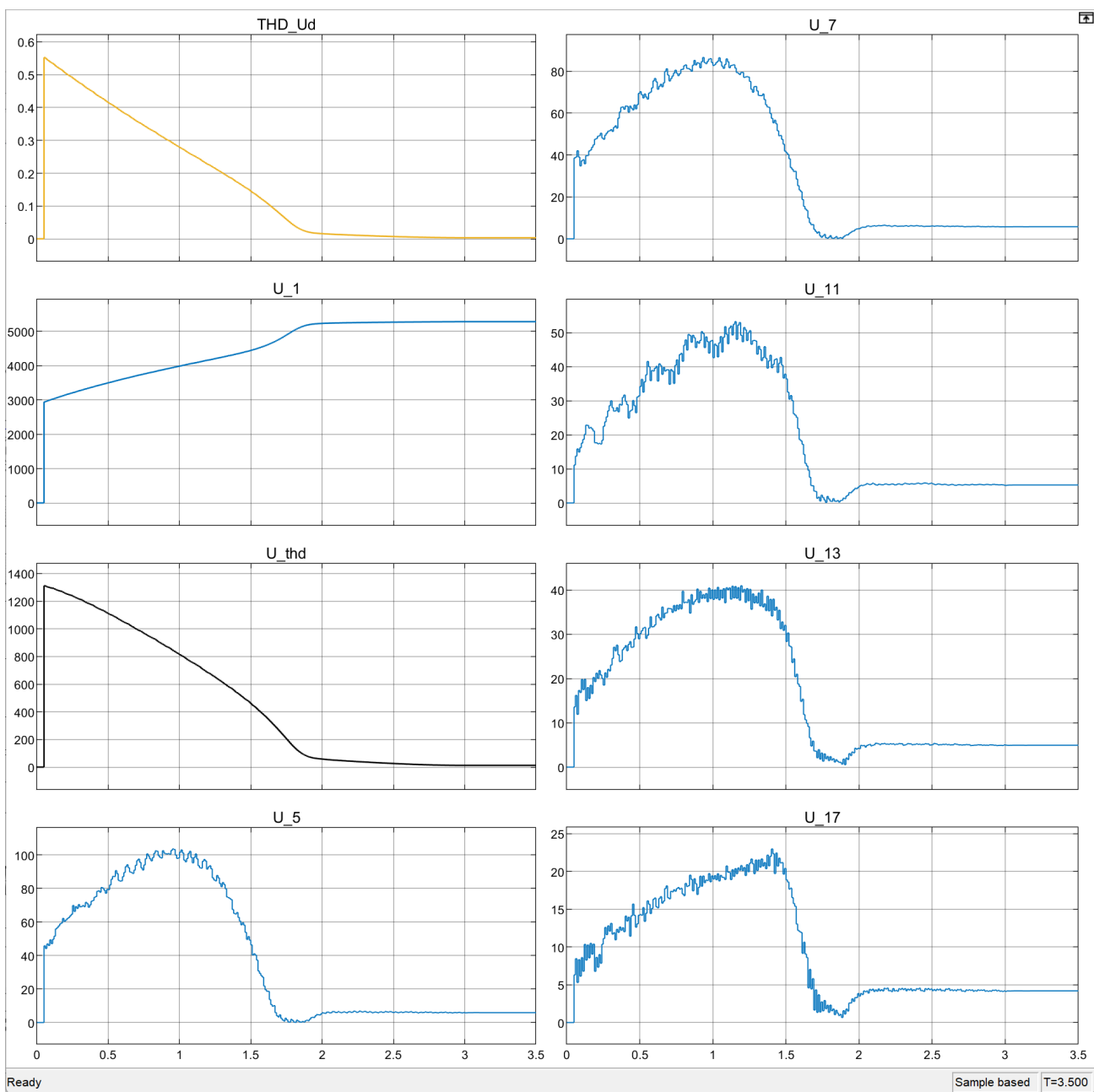


Рисунок 3.20. – Показники напруги фази двигуна

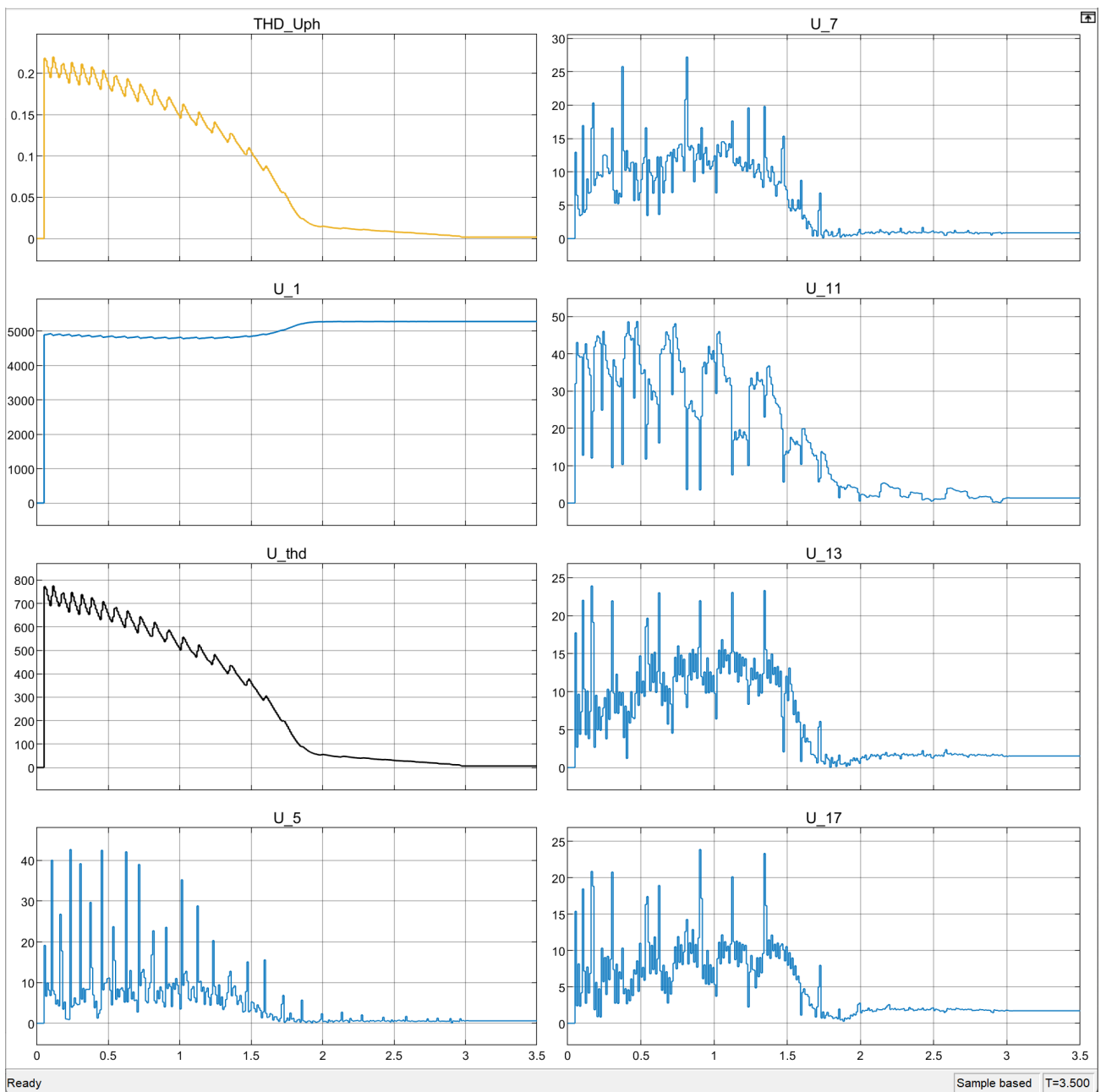


Рисунок 3.21. – Показники напруги фази мережі

Отримані показники задовольняють всім вимогам якості електричної енергії. Перш за все, звертаємо увагу на THD за струмом не перевищує 0.07, THD за напругою на двигуні – менше 0.6, в мережі – менше 0.2. Пристрій плавного пуску с GTO забезпечив точне зростання напруги за заданим законом, відповідно амплітуда 1-ї гармоніки струму більше, ніж в ТПН, що і призводить до більшого

моменту та прискорення в процесі пуску. Важливо також, що пульсації електромагнітного моменту з частотою комутації GTO 600 Hz не перевищують 20 % номінального моменту двигуна, а при 1000 Hz – 7 %.

Таким чином, використання GTO з шунтуючим конденсатором в блоці керування тиристорами може суттєво покращити показники пристроїв плавного пуску.

Але необхідно звернути увагу на відносно велику ємність конденсатору. Вона значно менше, ніж сумарна ємність конденсаторів в високовольтних перетворювачах частоти співмірної потужності, але це високовольтний пристрій, тому його вартість доволі велика.

Але при моделюванні перехідних процесів з конденсаторами меншої ємності було виявлено виникнення резонансних коливань. На рис. 3.22 надано перехідні процеси при $C = 100 \mu F$, де видно, що в усталеному режимі при повністю відкритих тиристорах відбуваються коливання моменту. При подальшому зменшенні ємності система АД–мережа стає нестійкою. Граничне мінімальне значення ємності для обраного двигуна складає приблизно $C = 150 \mu F$. Подальше дослідження цього питання виходить за рамки даного дослідження.

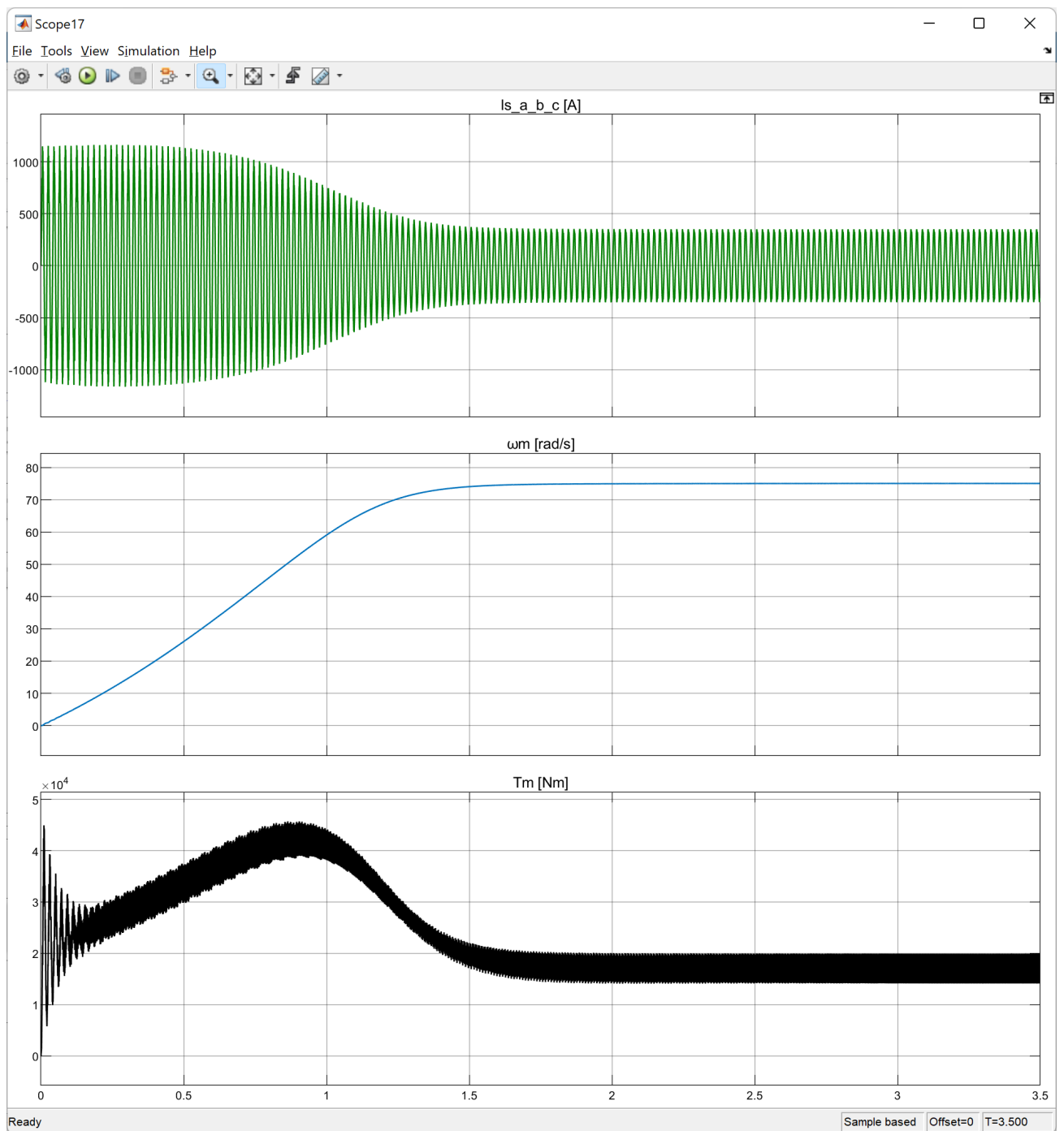


Рисунок 3.22. – Пуск асинхронного двигуна з фізичними GTO з $C = 100\mu F$

Також визначимо мінімальну частоту комутації.

На рис. 3.23 порівняно перехідні процеси та показники за струмом для частоти комутації 600 Hz, 300 Hz.

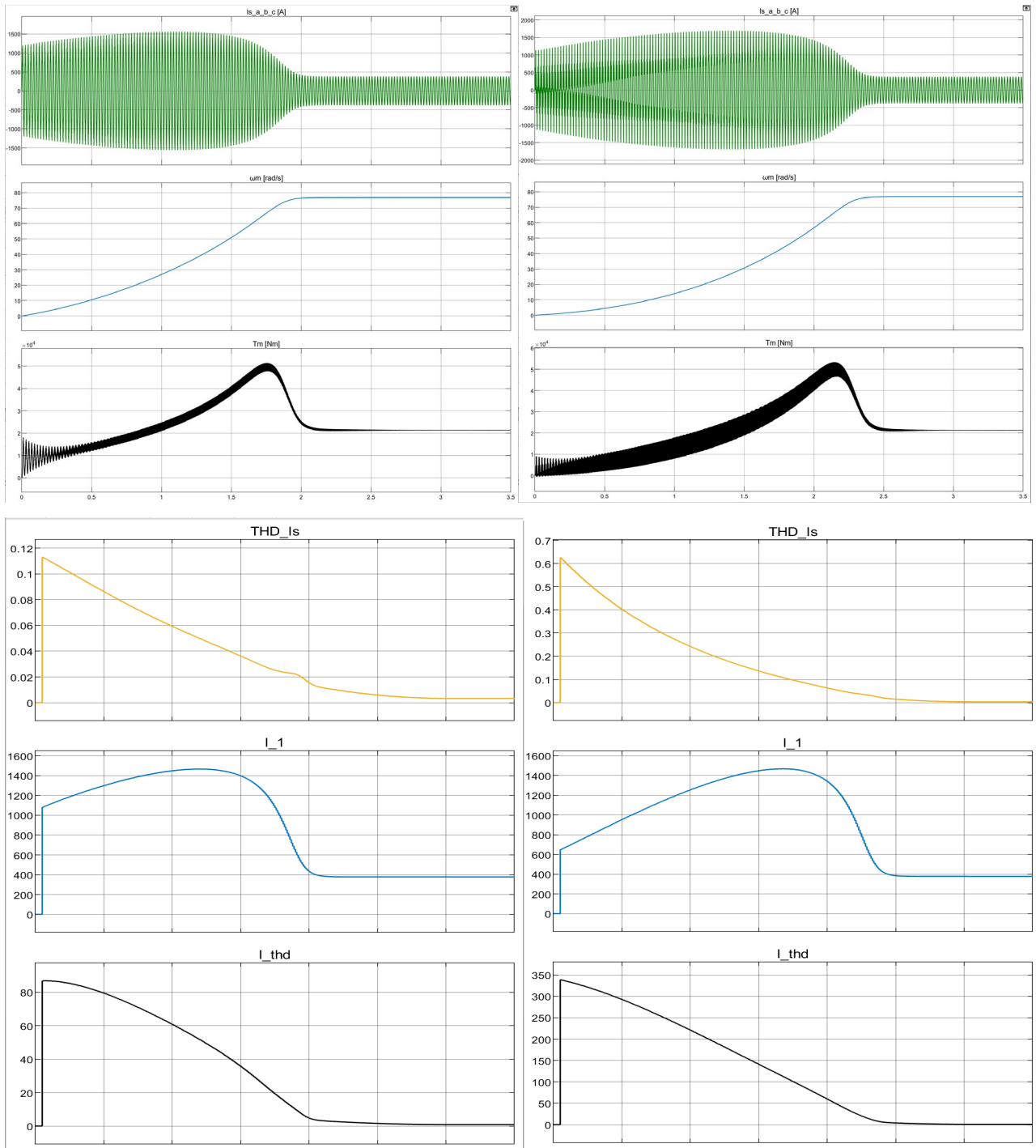


Рисунок 3.23. – Графіки перехідних процесів та показники за струмом для частоти комутації 600 Hz (зліва), 300 Hz (справа)

Очевидно суттєве зростання амплітуди пульсацій моменту при зменшенні частоти комутації.

Аналіз даних при різних частотах комутації та ємності конденсатора в блоках тиристорів виявив наступну закономірність між максимальним коефіцієнтом гармонічних спотворень за струмом на початку перехідного процесу від частоти комутації (Табл. 3.2, рис. 3.24).

Таблиця 3.2. Залежність THD за струмом статора від частоти комутації та ємності конденсатора

f, Hz	THD - 150 μ F	THD - 200 μ F	THD - 250 μ F
250	1.4880	1.0200	0.7503
300	0.9705	0.6300	0.4555
400	0.4337	0.3000	0.2230
500	0.2432	0.1720	0.1319
600	0.1585	0.1150	0.0865
750	0.0963	0.0700	0.0534
800	0.0870	0.0630	0.0485
1000	0.0560	0.0405	0.0311

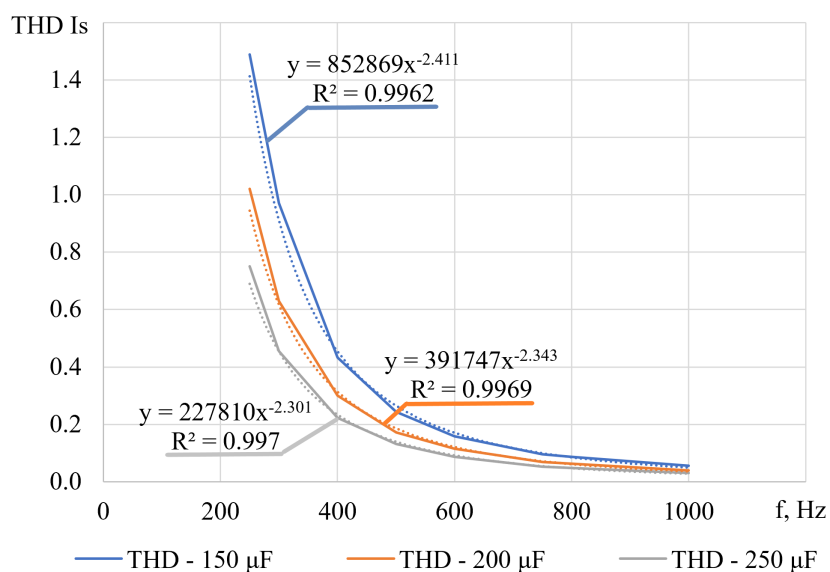


Рисунок 3.24. – Залежність THD за струмом статора від частоти комутації та ємності конденсатора

За формулою тренду можна розрахувати частоту комутації для одержання необхідного рівня THD за струмом статора:

$$\begin{aligned}f_{C=150\mu F} &= 289.13(THD)^{-0.413}, \\f_{C=200\mu F} &= 244.63(THD)^{-0.426}, \\f_{C=250\mu F} &= 213.35(THD)^{-0.433}.\end{aligned}$$

Таким чином, результати моделювання фізичних GTO надають змогу стверджувати, що за якісними показниками з точки зору спотворення в мережі за струмом та напругою, пульсацій електромагнітного моменту пристрій плавного пуску може задовільнити усі необхідні вимоги для суднового підрулюючого пристрою з регульованим кроком гвинта.

4. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ СТРУМУ, МОМЕНТУ, ШВИДКОСТІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ З ПОВНІСТЮ КЕРОВАНИМИ ТИРИСТОРАМИ (GTO)

Такий спосіб керування силовою частиною, який насамперед позбавляє від вищих гармонік, дозволяє синтезувати регулятори будь-якої координати – струму, моменту, швидкості. На рис. 4.1 послідовно надано моделі для розімкнутої системи з задатчиком напруги, замкнених систем з пропорційно-інтегральними регуляторами швидкості, моменту, струму. Усі регулятори для позбавлення від високочастотних завад працюють з кроком квантування за часом 0.01 s. За струмом і електромагнітним моментом вимірюється діюче значення сигналу зворотного зв'язку.

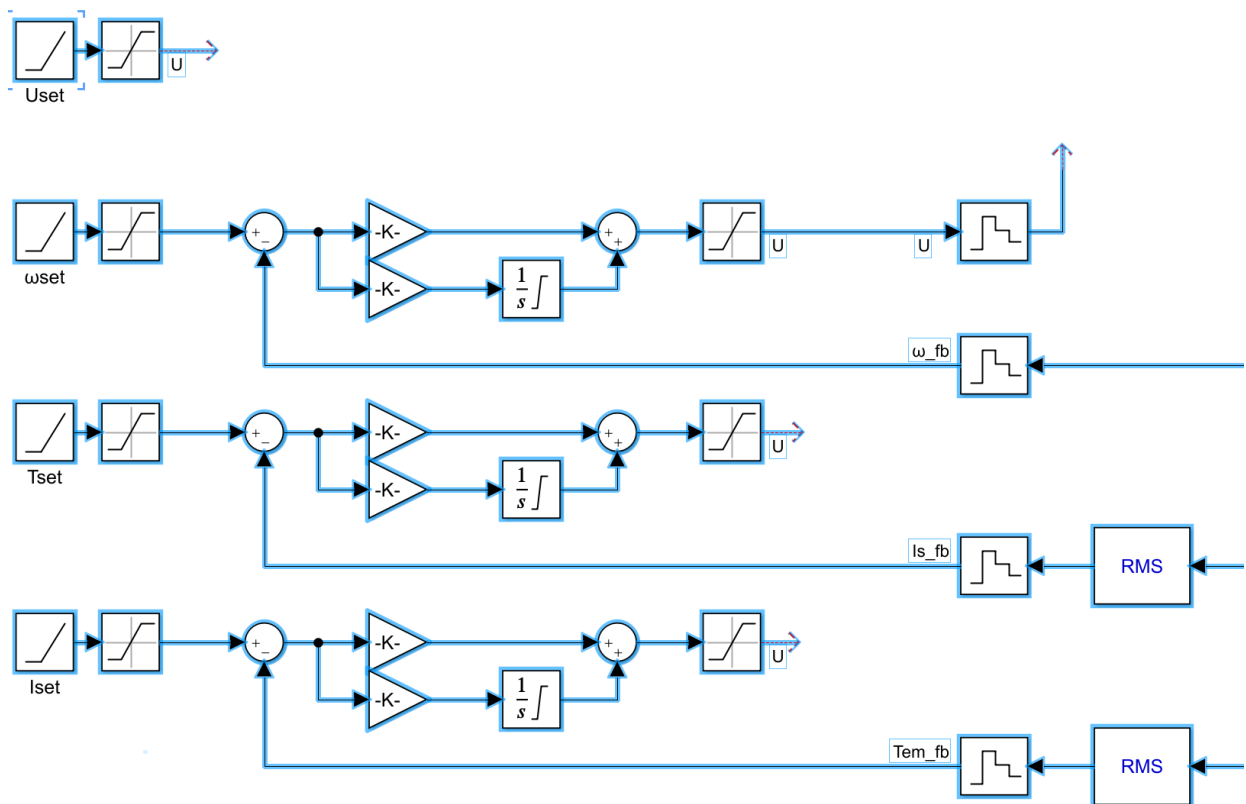


Рисунок 4.1. – Моделі регуляторів пристрою плавного пуску

На рис. 4.2–4.7 надано графіки перехідних процесів та показники електроприводу для відповідної системи регулювання.

Так, з пропорційно-інтегральним регулятором електромагнітного моменту з лінійним задатчиком можемо отримати наступні перехідні процеси.

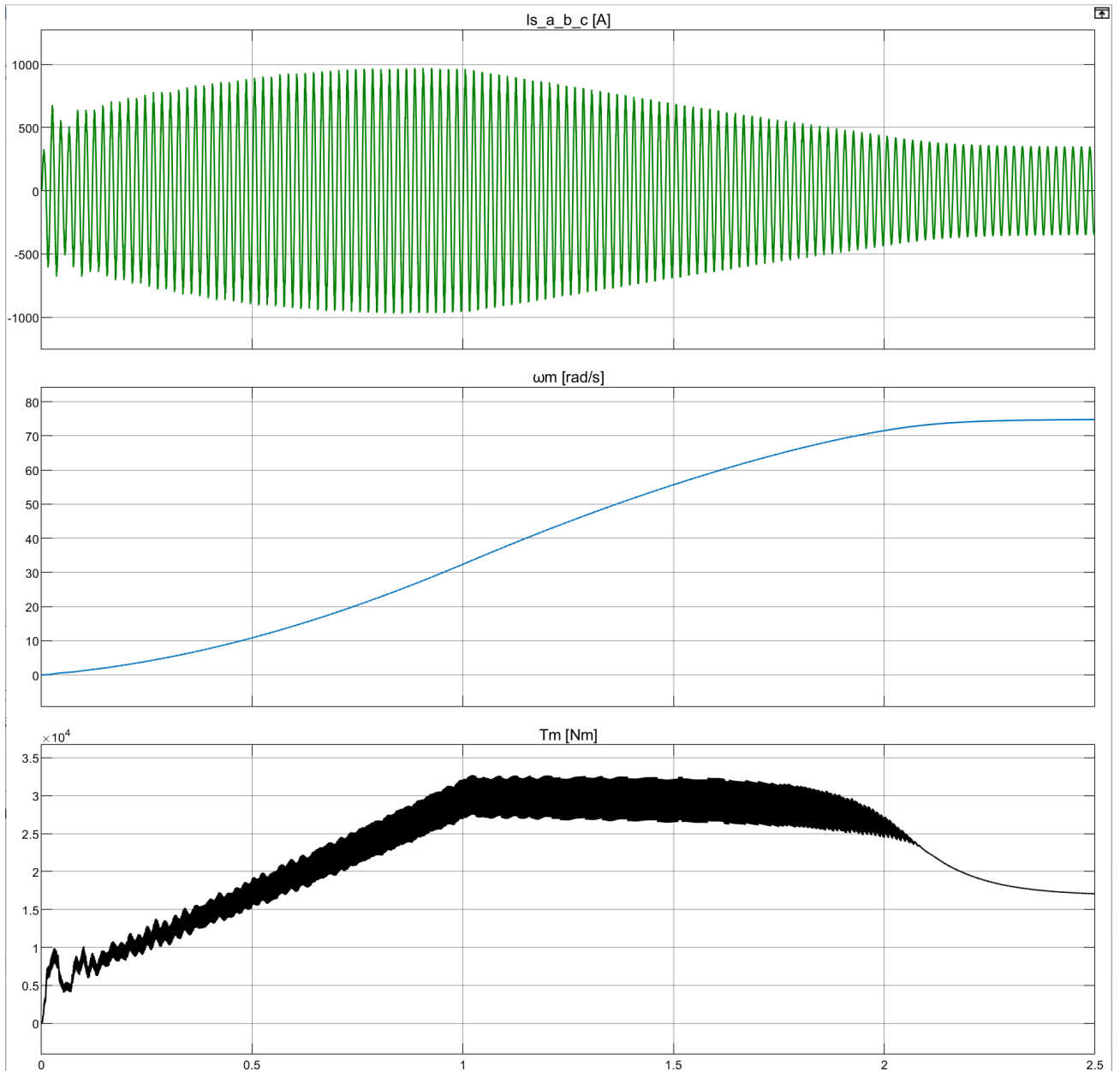


Рисунок 4.2. – Графіки перехідних процесів з регулятором моменту

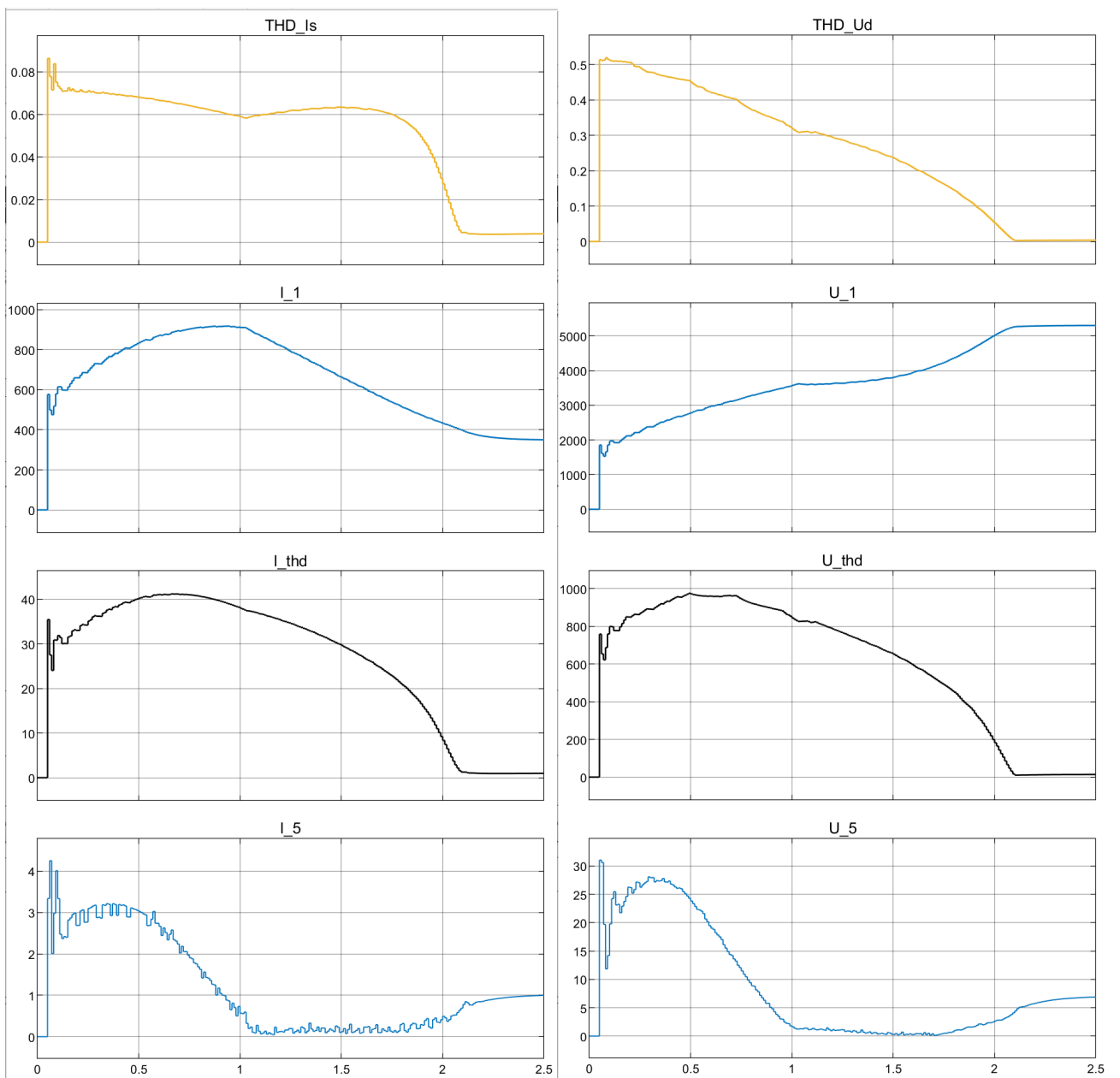


Рисунок 4.3. – Основні електроенергетичні показники з регулятором моменту

З пропорційно-інтегральним регулятором струму статора з лінійним задатчиком отримаємо такі перехідні процеси.

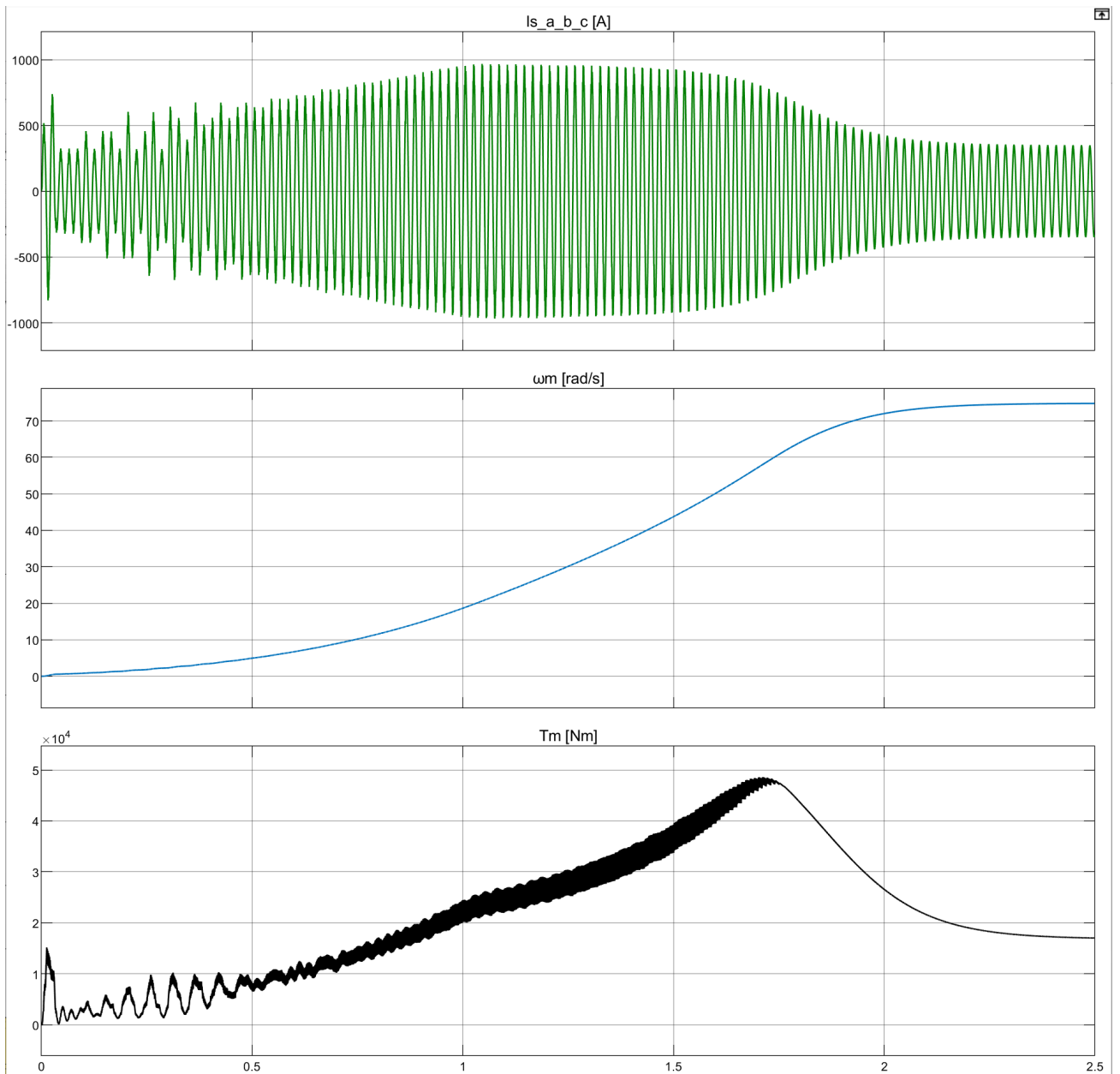


Рисунок 4.4. – Графіки перехідних процесів з регулятором струму

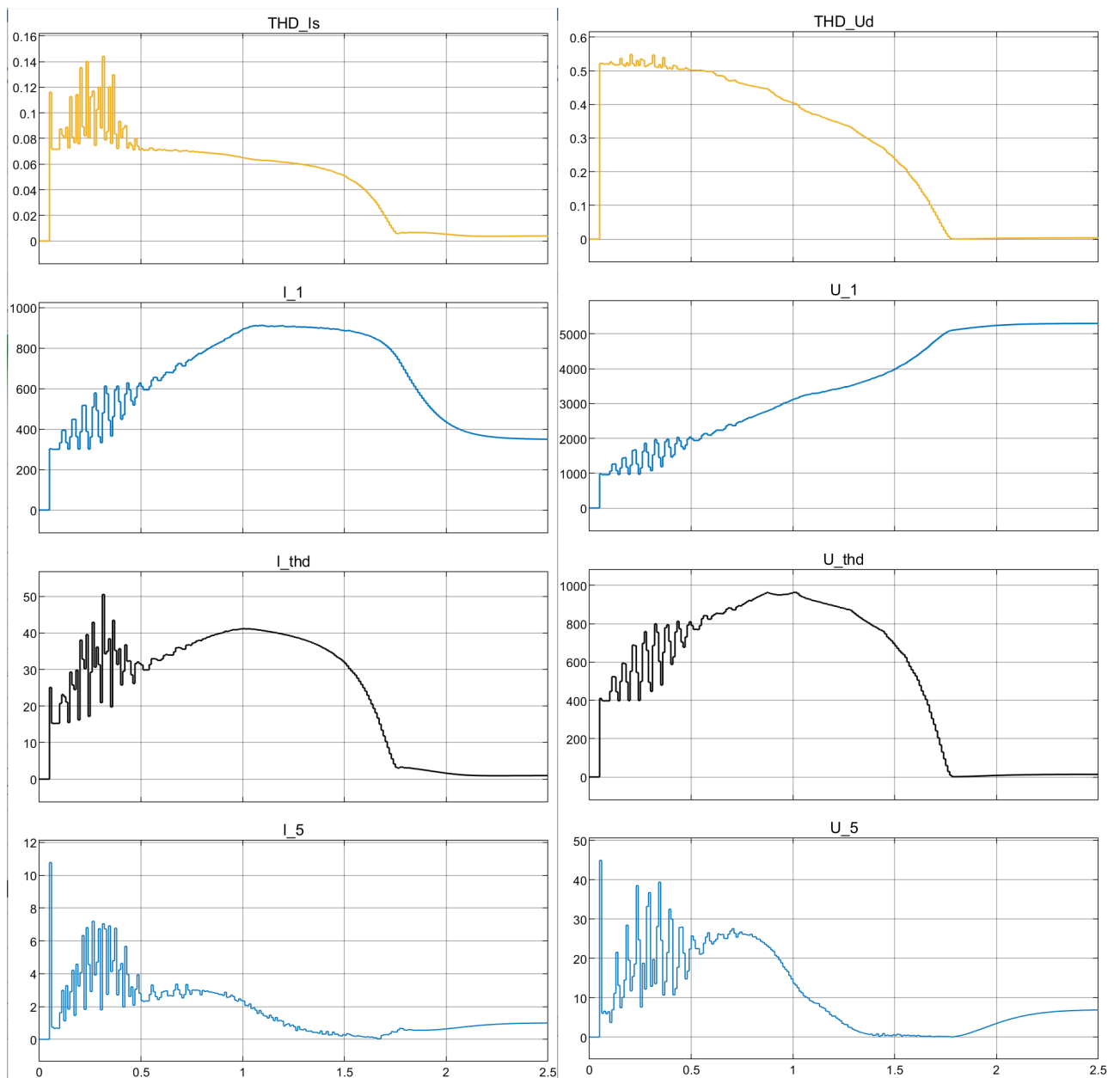


Рисунок 4.5. – Основні електроенергетичні показники з регулятором струму

І найкращі з точки зору багатьох механізмів перехідні процеси можна отримати також з пропорційно-інтегральним одноконтурним регулятором швидкості. Ці графіки за точністю відпрацювання лінійної тахограми незначно відрізняються від тахограми, який формує електропривод з перетворювачем частоти.

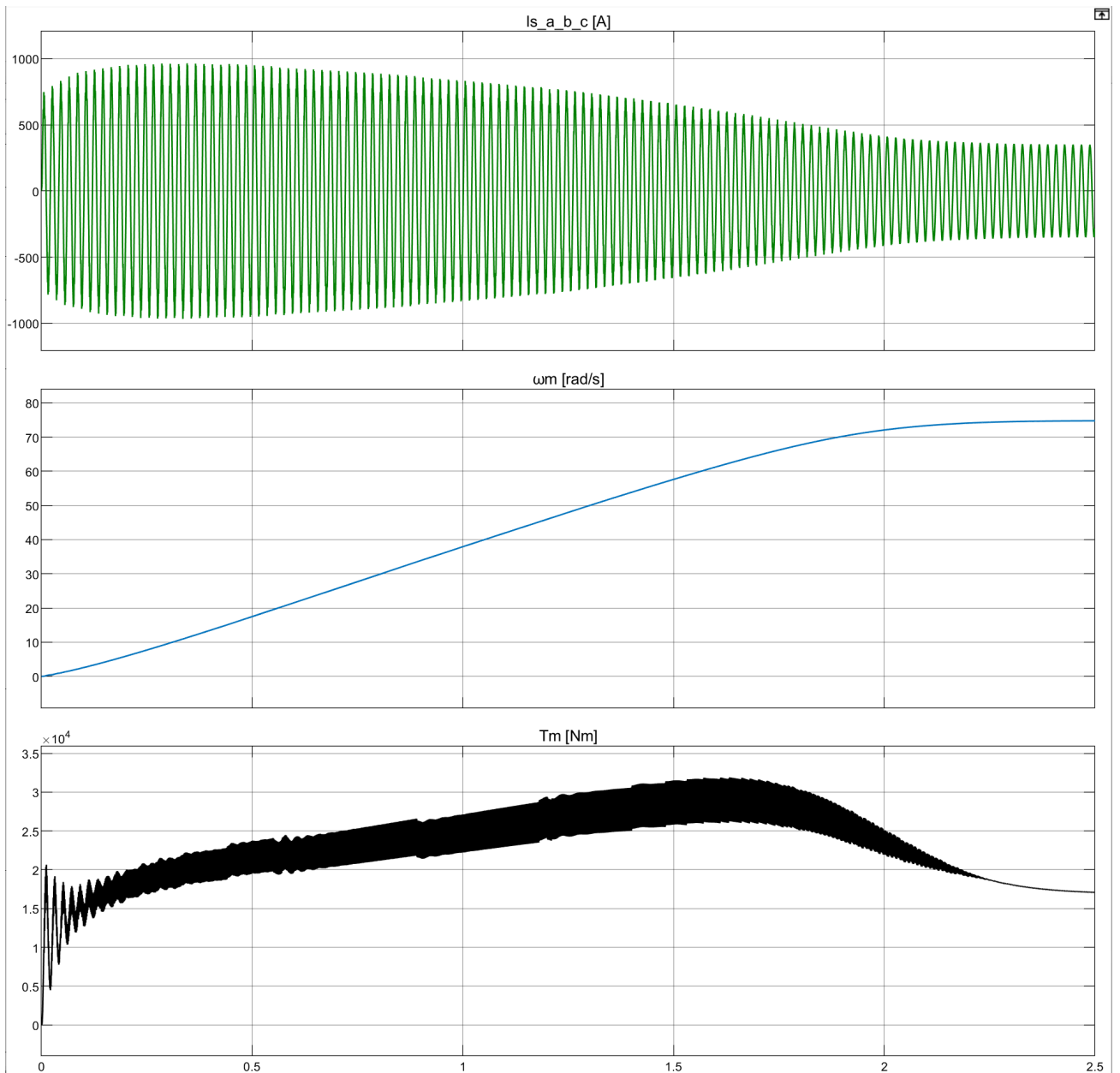


Рисунок 4.6. – Графіки перехідних процесів з регулятором швидкості

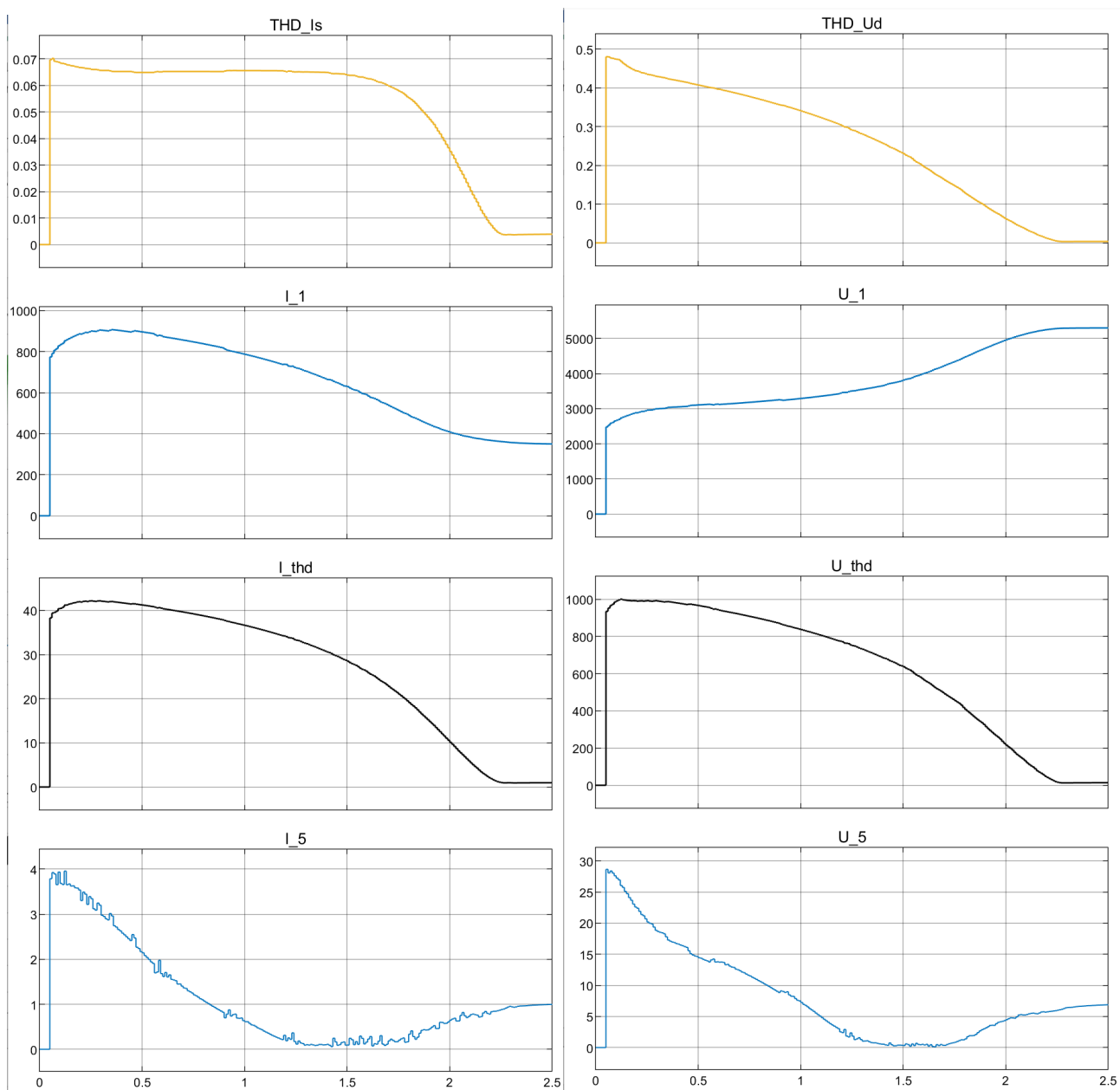


Рисунок 4.7. – Основні електроенергетичні показники з регулятором швидкості

З наданих регуляторів легко складеться двоконтурна система керування швидкістю з обмеженням моменту або струму, в якій можна отримати перехідні процеси пуску з обмеженням прискорення і ударних навантажень (рис. 4.8).

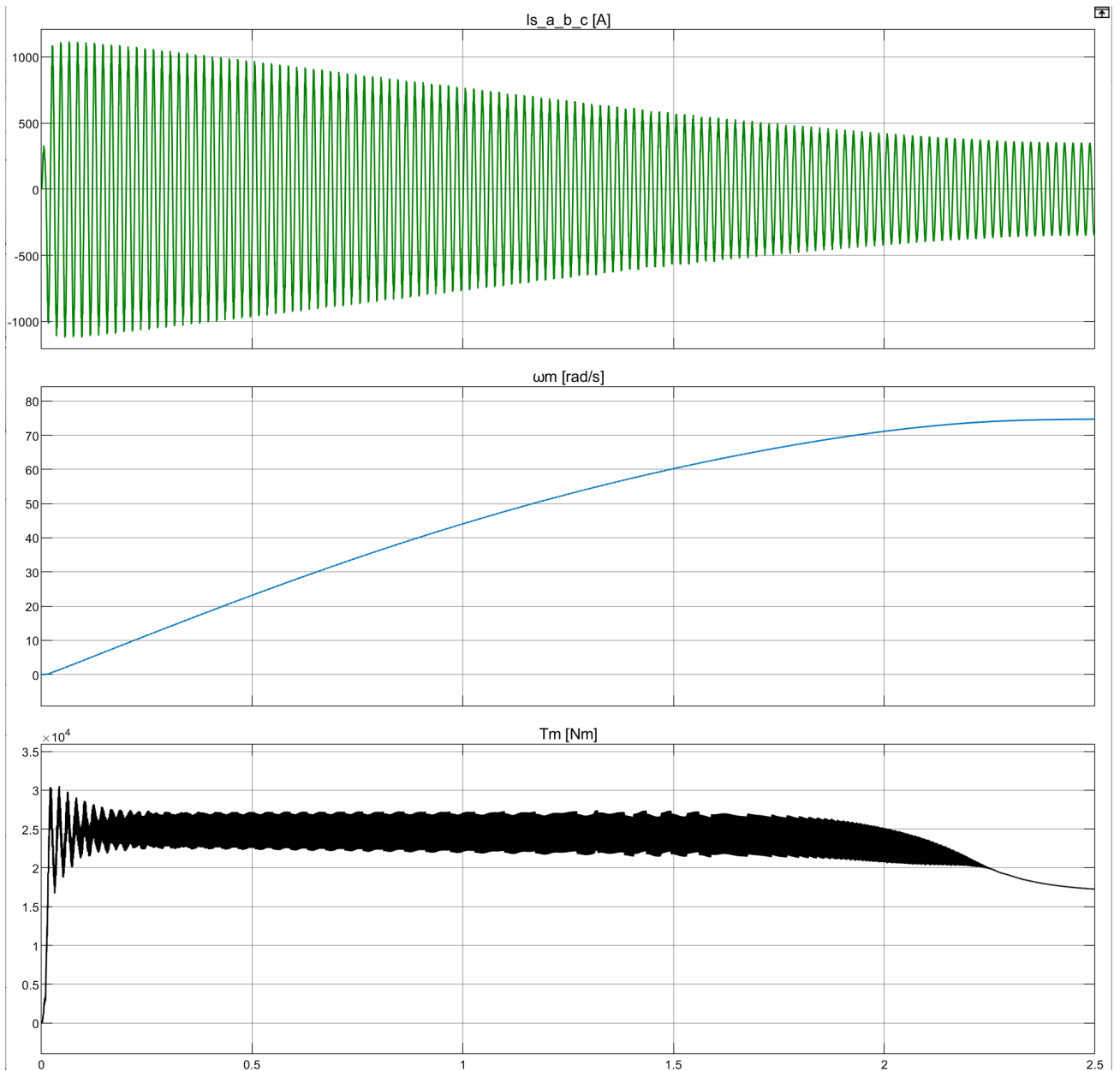


Рисунок 4.8. – Графіки перехідних процесів з регулятором швидкості

Таким чином, з використанням силової частини, побудованій на базі повністю керованих тиристорів, можна реалізувати пристрої плавного пуску з

показниками електромагнітної сумісності, які задовольняють вимогам суднової електроенергетичної системи. Крім того, при частоті комутації тиристорів 600–800 Hz завдяки малій амплітуді і високій частоті пульсацій електромагнітного моменту з'являється можливість побудови замкнених систем з пропорційно-інтегральними регуляторами струму, моменту, швидкості, або двохконтурних систем з регулюванням швидкості та обмеженням моменту або струму.

За динамічними показниками такі електроприводи відповідають вимогам до приводів підрулюючих пристроїв з регульованим кроком.

ВИСНОВКИ

В роботі проведено аналіз високовольтних пристроїв плавного пуску, які використовуються для приводу асинхронного двигуна підрулюючого пристрою з регульованим кроком гвинта. Характерними особливостями цих приводів є робота на вентиляторне навантаження та необхідність плавного пуску за достатньо короткий час (одиниці секунд) з єдиною метою – зменшення ударних моментів в механізмі – що саме і обумовлює доцільність використання відносно недорогих пристроїв плавного пуску.

В 1-му розділі проведено аналіз основних характеристик серійного високовольтного пристрою плавного пуску з силовою частиною на базі тиристорів.

В 2-му розділі для механізму з обраним типом двигуна потужністю 2.5 MW проведено математичне моделювання в програмному середовищі Matlab/Simulink/Simscape/Electric тиристорного перетворювача напруги на базі напівкерованих тиристорів. Показано, що такі пристрої спотворюють як струми, так і напругу на двигуні та в мережі обмеженої потужності, якою є суднова електроенергетична система.

В 3-му розділі в результаті аналізу двох варіантів виконання силового блоку з повністю керованими тиристорами (GTO) запропоновано рішення з шунтуючим конденсатором, яке забезпечує високу точність регулювання 1-ї гармоніки напруги на двигуні за заданим законом. Знайдено мінімальну величину ємності конденсатора, яка для двигуна ABB/AMD710L8T складає $150...200\mu F$ при частотах комутації від 500 до 1000 Hz.

Вперше знайдено залежності частоти комутації GTO від ємності конденсатора та коефіцієнту гармонічних спотворень струму в фазі статора обраного двигуна. Важливо, що за технічними вимогами до судових енергетичних мереж для потужних двигунів отримано частоти, які відповідають

фактичним фізичним характеристикам GTO (500–1000 Hz). При таких частотах комутації характеристики пристрою плавного пуску практично не відрізняються від ідеального регулятора фазної напруги асинхронного двигуна.

В 4-му розділі, базуючись на отриманих технічних характеристиках розімкненого електропривода, показано можливість синтезу замкнених систем зі стабілізацією струму, моменту, швидкості, а також двоконтурної системи з формуванням заданої тахограми при обмеженні моменту.

Враховуючи те, що з технічної точки зору в високовольтних електроприводах простіше реалізувати вимірювання швидкості (за допомогою відносних енкoderів) та найважливішою функцією є саме регулювання швидкості, вважаємо, пристрої плавного пуску доцільно виконувати на базі повністю керованих тиристорів та з вбудованим регулятором швидкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Глазева, О.В. Применение высоковольтных преобразователей частоты как метод повышения индекса энергоэффективности на объектах морской индустрии [Текст] / О.В. Глазева, В.Б. Власов // Матеріали науково-методичної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 05.12.2018 - 06.12.2018. – Одеса: НУ «ОМА», 2018. – С.70-78
2. Кузькин В.И., Мелешкин В.Н., Мясищев С.В., Симоненков Д.В., Шипаева С.Н. Высоковольтный преобразователь частоты для питания асинхронных двигателей. «Электротехника», 2004 г., №10, с. 19 – 24.
3. Бурдасов, Б.К. Преобразователи частоты для высоковольтных электроприводов переменного тока [электронный ресурс] / Б. К. Бурдасов, С.А. Нестеров, Ю.Б. Федотов // Электронный научный журнал APRIORI. Серия: естественные и технические науки. – 2015. – № 4.
4. Глазева, О., Бушер, В. Особливості методу визначення внутрішніх опорів джерел автономних трифазних мереж. [Текст] // International conference SHIPS' ELECTRICAL ENGINEERING, ELECTRONICS AND AUTOMATION, 05.12.2018 – 06.12.2018 – Odessa: NU «ОМА». – 2019. – P. 190–195. Access mode : http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/electro_conf_50_60ka_228str.pdf
5. Бушер, В. В. Забезпечення електромагнітної сумісності потужного пристрою плавного пуску із судновою мережею в динамічних режимах / В. В. Бушер, В. М. Захарченко, О. В. Глазева, К. А. Хандакжи // Технічна електродинаміка. ISSN 1607-7970 (print) ISSN 2218-1903 (online). – Київ: Institute of Electrodynamics, 2019. – 2019, Vol. 1 – С. 29–33. <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.029>
6. Захарченко В. М. Аналіз електромагнітної сумісності потужного пристрою плавного пуску із судновою мережею в динамічних режимах [Текст] / В.

- М. Захарченко, В. В. Бушер, О. В. Глазева, К. Хандакжи // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: Техника, 2016. – Вып. 21(97). – С. 17–23. <http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.21.97.2016.02>
7. Бушер, В.В. Дослідження високовольтних перетворювачів частоти в судових електроенергетичних системах [Текст] / В.В. Бушер, О.В. Глазева, К.О. Морозов, Космас Здрозис // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 05.11.2019 - 06.11.2019. – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С.231-237
8. V. Manimala, Mrs.N. Geetha.M.E, Dr.P. Renuga, Design and Simulation of Five Level Cascaded Inverter using Multilevel Sinusoidal Pulse Width Modulation Strategies, IEEE 2011, 978-1-4244-8679-3
9. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высших учеб. заведений/ В.В. Москаленко. - М.: Издательский центр «Академия», 2007.- 368с.
- 10.https://en.wikipedia.org/wiki/Gate_turn-off_thyristor#cite_note-hingorani-1.
- 11.https://en.wikipedia.org/wiki/Gate_turn-off_thyristor#cite_note-2
- 12.Теория электропривода, ч.1: учебное пособие/Сост.: А.Б. Зеленов – Алчевск, Дон ГТУ, 2005. – 382 с.
- 13.Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для студентов ВУЗов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" и по специальности "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" - М.: Энергоатомиздат, 2001.
- 14.Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: Учебник для вузов.- Санкт-Петербургское отделение, 1994.- 496с.: ил.
- 15.Локарев В.И. Судовые автоматизированные электроприводы: Учеб. пособие. - Николаев: УГМТУ, 2002.-160с.
- 16.Правила Регистра Украины для морских и речных судов. Киев: 2003.

- 17.Правила техники безопасности на судах морского флота. РД31.81.10-75. - М «Мортехинформреклама», 2004.- 300с.
- 18.Толстов А.А. Устройство и эксплуатация судовых синхронных генераторов: Учеб. пособие.- Одеська нац. Морська академія. – Одеса, 2006.
- 19.Толстов А.А. Автоматические выключатели: Учеб. пособие.- Одеська нац. Морська академія. – Одеса, 2012.
- 20.Воскобович Ю. В. и др. Электроэнергетические установки и силовая электроника транспортных судов. – СПб: Элмор, 2001.
- 21.Воскобович В.Ю., Королева Т.Н., Павлова В.А. Электроэнергетические установки и силовая электроника транспортных средств. / Под ред. Ю.А. Лукомского. // Учебное издание. – СПб.: «Элмор», 2001. - 384с.
- 22.Васильев В.В., Симак Л.В., Рыбникова В.Р. «Математическое и компьютерное моделирование в среде MATLAB –М., 2008.
- 23.В.П.Дьяконов. MATLAB + Simulink в математике и моделировании. СОЛОН-Пресс, 2003.
- 24.Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. «Устойчивость энергосистем», В 2-х т. - СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2008. - Т. 2. - 376 с.
25. Kundur, P.Power System Stability and Control. New York, NY: McGraw Hill, 1993.
26. Lyshevski, S. E. Electromechanical System, Electric Machines and Applied Mechatronics. Boca Raton, FL:CRC Press, 1999.
- 27.МН. Ahmed and P.J. Spreadbury. Analogue and digital electronics for engineers. 2nd Edition, Cambridge University Press, 1984.
- 28.G. Massobrio and P. Antognetti. Semiconductor Device Modeling with SPICE. 2nd Edition, McGraw-Hill, 1993.

29. Lauritzen, P.O. and C.L. Ma. "A Simple Diode Model with Reverse Recovery." IEEE® Transactions on Power Electronics. Vol. 6, No. 2, April 1991.
30. Van Langevelde, R., A. J. Scholten, and D.B.M. Klaassen. "Physical Background of MOS Model 11. Level 1101." Nat.Lab. Unclassified Report 2003/00239. April 2003.
31. Тимофеев Ю.К. Системы управления судовыми энергетическими процессами. Учеб. для вузов, - СПб.: Судостроение, 1994.
32. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление: Справ. пособие: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240с.
33. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: Учебное пособие. – М.: Транспорт, 2001. – 464с.
34. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2001.- 384 с.
35. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320с.: ил.
36. Петров И.В. Программируемые контроллеры, Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / Под ред. проф. В.П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256.: ил. – (Серия «Библиотека инженера»)
37. Судовые электроприводы: Справочник /А.П. Богословский, Е.М. Певзнер, И.Р. Фрейдзон, А.Г. Яуре – 2-е изд., переаб. и дополн. в двух томах. – Л.: Судостроение 1983. Т1 – 322 с., Т2 – 384 с., ил.
38. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; За ред.. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
39. Altivar 71. Programming manual. Schneider Electric, 2008. – 260 p.

- 40.Правила технической эксплуатации морских и речных судов.
КНД31.2.002.01-96. Утверждено приказом Государственного департамента
морского и речного транспорта Украины от 02.09.96. Приказ №270.
- 41.GESSMANN. Industrial Controllers. Catalog, 2005. – 177 p.
- 42.Клевцов А.В. Преобразователи частоты для электропривода переменного
тока. Практическое пособие для инженеров. – Тула: Гриф и К, 2008. – 224
с.
- 43.Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации: учеб. пособие для
вузов / М.П. Белов, О.И. Зементов, А.Е. Козярук и др.; под ред. В.А.
Новикова, Л.М. Чернигова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. –
368 с.
- 44.Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для
вузов/ И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я.
Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
- 45.С. Рама Редди. Основы силовой электроники. – М.: Техносфера, 2006. – 288
с.
- 46.Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным
регулированием: учебник для вузов. – М.: Издательский центр
«Академия», 2006. – 272 с.
- 47.Моделювання електроприводів: Навч. Посібник /Л.Д. Костинюк, В.І.
Мороз. Я.С. Паранчук. – Львів: Видавництво Національного університету
«Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
- 48.Интернет ресурс, сайты: www.mitsubishiautomation.ru, www.deif.com,
www.selko.com, www.abb.com., www.hyundai.com