

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Розробка ефективного способу широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою»

КНУ.МР.141.24.776-09

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-23м /Данило ОНИЩЕНКО/

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

_____ /Ірина КАСАТКІНА/

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

_____ /Ірина КАСАТКІНА/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ОНИЩЕНКО Данило Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка ефективного способу широтно-імпульсної модуляції
для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є дослідження ефективності способів широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою. Завданням є розробка ефективного способу широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Аналіз способів керування багаторівневими перетворювачами; II. Структура трирівневого перетворювача з фіксованою нульовою точкою; III. Система керування трирівневим перетворювачем з фіксованою нульовою точкою.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Структура трирівневого перетворювача; II. Діаграми формування векторів; III. Модуляція сигналів; IV. Алгоритм синтезу задаючих сигналів; V. Система регульованого електроприводу на базі трирівневого перетворювача; VI. Аналіз режимів роботи електроприводу з трирівневим перетворювачем.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Касаткіна І.В.		
II	Касаткіна І.В.		
III	Касаткіна І.В.		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Структура трирівневого перетворювача	12.09.24
2	Діаграми формування векторів	17.09.24
3	Модуляція сигналів	24.09.24
4	Розробка алгоритму синтезу задаючих сигналів	28.10.24
5	Система регульованого електроприводу на базі трирівневого перетворювача	24.11.24
6	Аналіз режимів роботи електроприводу з трирівневим перетворювачем	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Онищенко Д.О.
(ПІБ)

Керівник роботи _____
(підпис)

Касаткіна І.В.
(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи магістра на тему: «Розробка ефективного способу широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою»

Об'єкт розробки – трирівневий інвертор з фіксованою нульовою точкою.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела, та досліджено існуючі способи широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою.

У другому розділі представлена структура трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою. Запропоновано спосіб широтно-імпульсної модуляції для розглянутої структури.

У третьому розділі досліджено ефективність запропонованого способу широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою. Дослідження встановили, що запропонований спосіб широтно-імпульсної модуляції зменшує втрати у трирівневому інверторі.

**ТРИРІВНЕВИЙ ІНВЕРТОР, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ,
СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ**

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Аналіз способів керування трирівневими інверторами	11
1.1. Аналіз способів керування для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою	11
1.2. Задачі досліджень.....	13
Розділ 2. Структура трирівневого інвертора	14
2.1. Загальна методика формування способів керування трирівневою структурою інверторів	14
2.2. Розробка способу широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою.....	18
Розділ 3. Дослідження ефективності способів широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою	22
3.1. Розробка математичного апарату для визначення ефективності способів широтно-імпульсної модуляції	22
3.2. Дослідження перехідних процесів у структурі трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою	29
Висновки	48

Вступ

Промислові електромеханічні системи потребують дієвих способів регулювання своїх характеристик виходячи з можливості зміни їх параметрів під час роботи.

Впровадження регульованих електромеханічних систем у структури технологічних установок зазвичай виконується за допомогою новітніх розробок щодо регулювання координат електричних двигунів, як виконавчих механізмів у структурах технологічних установок та комплексів виходячи із потреб виробничого процесу.

Доволі простим способом регулювання робочих координат електричних двигунів, як складових електромеханічного комплексу у цілому, є використання у якості керуючого елемента напівпровідникових перетворювачів.

Для потреб промисловості у виробничому процесі зазвичай використовуються електричні двигуни великої та середньої встановленої потужності.

Зазвичай це електричні машини змінного струму, переважна більшість яких це асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, велика кількість яких використовується у якості нерегульованої частини електромеханічної системи.

Саме тому для підвищення ефективності роботи електромеханічної системи необхідно застосовувати впровадження можливості регулювання її параметрів.

Перетворювальні пристрої покликані зробити цей процес простим та ефективним.

Для потреб промисловості використовуються перетворювальні пристрої великої та середньої потужності, у відповідності до встановленого навантаження.

Такі перетворювачі на ринку широко представлені структурами з ланкою постійного струму.

Такий підхід дозволяє здійснювати ефективне керування координатами електричного двигуна.

Але при цьому слід зазначити, що у базовому варіанті створює суттєві завади щодо роботи суміжного обладнання та мережі живлення промислових установок.

Цей процес обумовлений необхідністю перетворення параметрів напруги мережі живлення у відповідності до потреб виробничого процесу, що забезпечує електричний двигун, як виконавчий елемент технологічного комплексу.

Поліпшити показники ефективності перетворення параметрів електричної енергії мережі живлення можливо використовуючи усунення недоліків.

Якщо у якості первинного перетворювача використовується некерований випрямляч то зазвичай розглядають методи щодо поліпшення процесу перетворення параметрів електричної енергії у структурі керованої інверторної групи.

Такі поліпшення можна виконувати у напрямку поліпшення структури інверторної групи, або у напрямку поліпшення способу керування інверторною групою.

За останні роки набули поширення системи перетворення параметрів електричної енергії мережі живлення до складу яких входять інверторні

групи з багаторівневою структурою виконання компонування ключових елементів.

Найбільш поширеним виконанням систем перетворення параметрів електричної енергії мережі живлення до складу яких входять інверторні групи з багаторівневою структурою виконання компонування ключових елементів є трирівневі перетворювачі.

Вони відрізняються низьким рівнем комутаційних втрат, та вищою частотою комутації напівпровідникових елементів, що входять до їх структури.

Для поліпшення режимів роботи електромеханічних систем, що містять системи перетворення параметрів електричної енергії мережі живлення до складу яких входять інверторні групи з трирівневою структурою виконання компонування ключових елементів необхідним є удосконалення методів керування роботою їх ключових елементів у комутаційних режимах.

Для поліпшення комутаційних процесів при роботі інверторних груп з трирівневою структурою виконання компонування ключових елементів необхідно вдосконалити спосіб керування ключовими елементами, що входять до структури інверторної групи перетворювального пристрою електромеханічної системи.

Формування параметрів живлення необхідної частоти виконується завдяки напрузі у ланці постійного струму, яка має бути збалансовано стабільною.

При цьому є ефективним використання способу трирівневої широтно-імпульсної модуляції.

Останні дослідження показують, що ефективним є спосіб ступеневої переривчастої широтно-імпульсної модуляції відповідно до параметрів напруги у ланці постійного струму.

Такий спосіб використовує просторове представлення форми керованого сигналу.

Також при використанні даного способу формується сигнал керування з використанням неперервної просторової широтно-імпульсної моделі.

Поєднання перервчастої та неперервної форми формування керуючого сигналу називають гібридним способом широтно-імпульсної модуляції інверторної групи.

Такий спосіб формування керуючого сигналу у структурі інверторної групи з трирівневою структурою виконання компонування ключових елементів дозволяє скористатися перевагами просторово-векторної форми комплектування керуючого сигналу щодо ключових елементів що її формують, а також усунути недоліки неперервної форми способу комплектування керуючого сигналу ключових елементів інверторної групи з трирівневою структурою виконання компонування структури її ключових елементів.

З одного боку застосування перервчастої форми широтно-імпульсної модуляції дозволяє суттєво знизити комутаційні втрати у ключових елементах інверторної групи, з іншого боку застосування неперервної форми компонування сигналів керування у ключових елементах інверторної групи дозволяє суттєво скоротити час щодо розрахунку тривалості включення ключових елементів інверторної групи, що суттєво полегшує обчислення цього процесу.

Подібні складні процеси можливо перевірити здійснивши розрахунки за допомогою обчислювальної техніки.

Застосування математичних програм щодо розрахунків дозволяю упевнитись у відповідності результатів роботи за допомогою демонстрації графіків.

Порівняльний аналіз способів формування керуючого сигналу інверторної групи з трирівневою структурою виконання компонування ключових елементів показує що застосування гібридного способу широтно-імпульсної комутації дозволить знизити втрати потужності у ключових елементах інверторної групи.

Розділ 1. Аналіз способів керування трирівневими інверторами

1.1. Аналіз способів керування для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою

Існуючі способи керування багаторівневими перетворювачами для потреб регульованого електроприводу розробляються виходячи зі складності подібної структури.

Наявність багатьох, більше ніж двох, рівнів у структурі перетворювача, накладає у вигляді обов'язкової умову щодо необхідності одночасно контролю кожного з таких рівнів.

Такі складні завдання для функціонування системи керування потребують нових підходів та мають базуватись на сучасних розробках у галузі перетворювальної техніки.

Роботу багаторівневого перетворювача можна розглянути на прикладі трирівневої структури.

У такій структурі може бути застосована як перервчаста так й неперервна комутація силових елементів схеми.

Важливим при роботі таких систем є форма опорного сигналу, яка використовується для здійснення процесу комутації силових елементів схеми.

До переваг перервчастої комутації можна відносно значне зменшення комутаційних втрат.

До недоліків застосування перервчастої комутації для багаторівневої структури перетворювача можна віднести наявність коливань напруги у нульовій точці, що відбувається у доволі широкому діапазоні робочих частот перетворювача.

Існують способи керування трирівневим перетворювачем, які базуються на аналізі векторів, що формуються на основі порівняння значень різниці напруги яка може бути отримана на кожному з рівнів багаторівневої структури.

Такі способи базуються на використанні секторального розподілу площини векторів.

Але з цим пов'язано збільшення комутаційних витрат у структурі перетворювача.

До переваг застосування векторної комутації для багаторівневої структури перетворювача можна віднести зменшення коливань напруги у нульовій точці.

Тому, для поліпшення процесу комутації у структурі багаторівневого перетворювача, пропонується поєднати два розглянуті способи, що дозволить знизити комутаційні витрати у доволі широкому діапазоні робочих частот перетворювача.

1.2. Задачі досліджень

Завданням роботи є поліпшення процесу комутації у структурі багаторівневого перетворювача.

Для цього пропонується поєднати два способи керування багаторівневою структурою перетворювача.

Такий підхід дозволить знизити комутаційні витрати у доволі широкому діапазоні робочих частот перетворювача.

Розділ 2. Структура трирівневого інвертора

2.1. Загальна методика формування способів керування трирівневою структурою інверторів

Структуру трирівневого перетворювача складають керовані ключі, які з'єднуються у відповідні ланки.

Такі ланки та формують відповідні плечі схеми, які додатково мають бути оснащені зворотними діодами.

Нульові точки відповідних плечей з'єднуються з конденсаторами, що забезпечують умови комутації керованих ключових елементів на відповідних рівнях перетворювача.

Саме у цих точках відбувається формування різниці напруги, що впливає на комутацію ключових елементів.

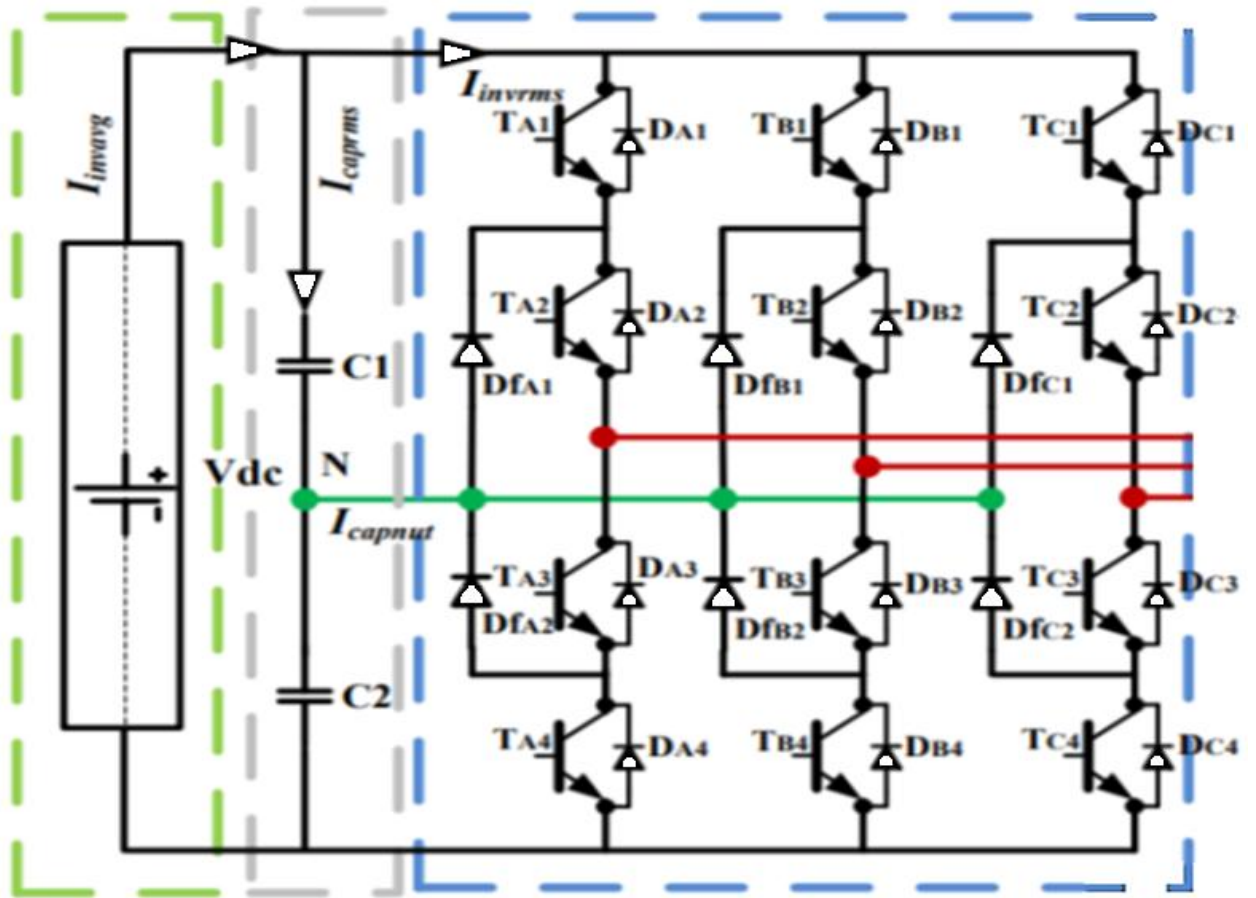


Рисунок 2.1 – Структура трирівневого перетворювача, яку складають керовані ключі, які з'єднуються у відповідні ланки

У просторовій формі можна навести діаграму формування комутаційних векторів.

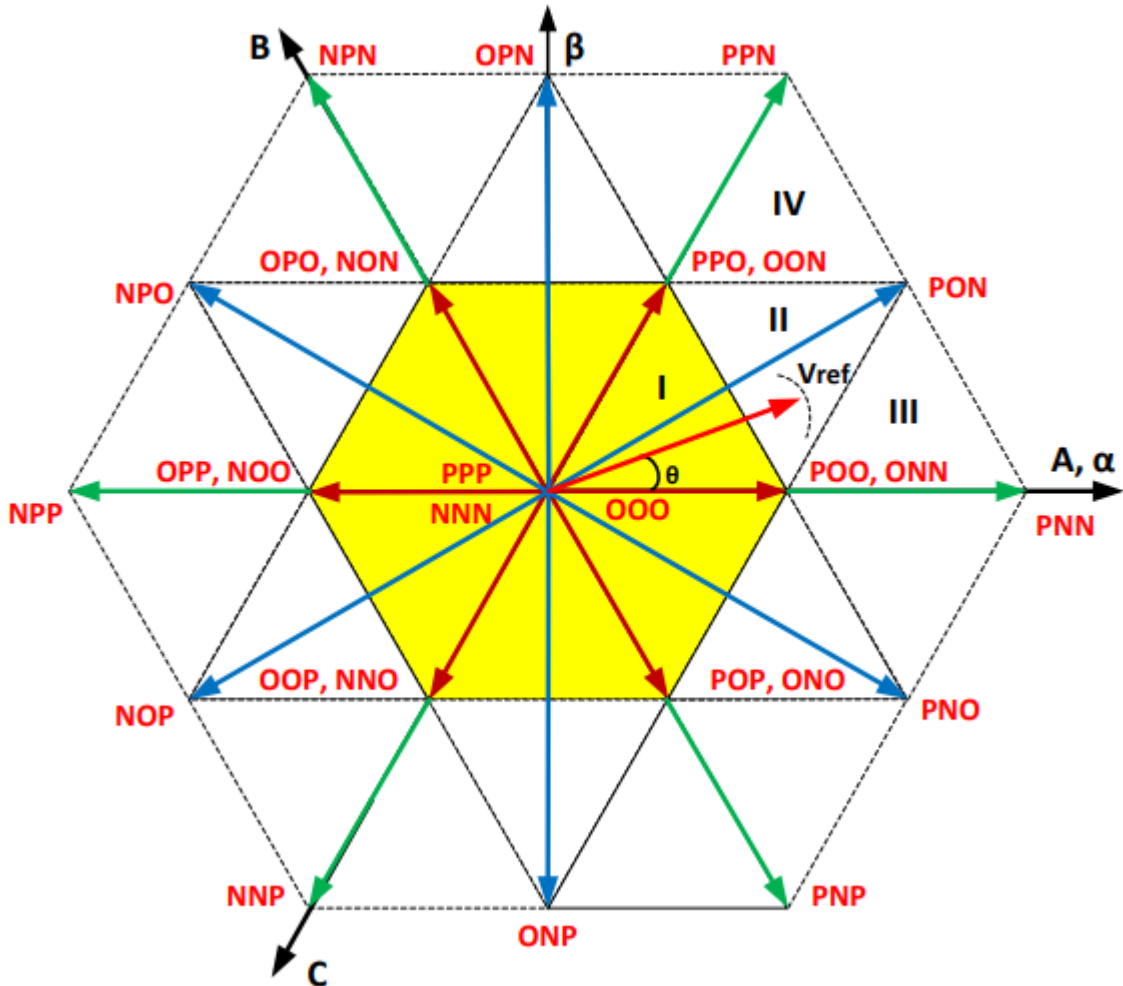


Рисунок 2.2 – Діаграма формування комутаційних векторів у просторовій формі

Тоді формування комутаційних векторів у табличній формі:

Таблиця 2.1 – Формування комутаційних векторів у табличній формі

Комбінація включення	Стан ключа фази x (a, b, c)				Вихідна напруга (V_{xn})
	T_{A1}	T_{A2}	T_{A3}	T_{A4}	
P	1	1	0	0	$V_{dc}/2$
O	0	1	1	0	0
N	0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

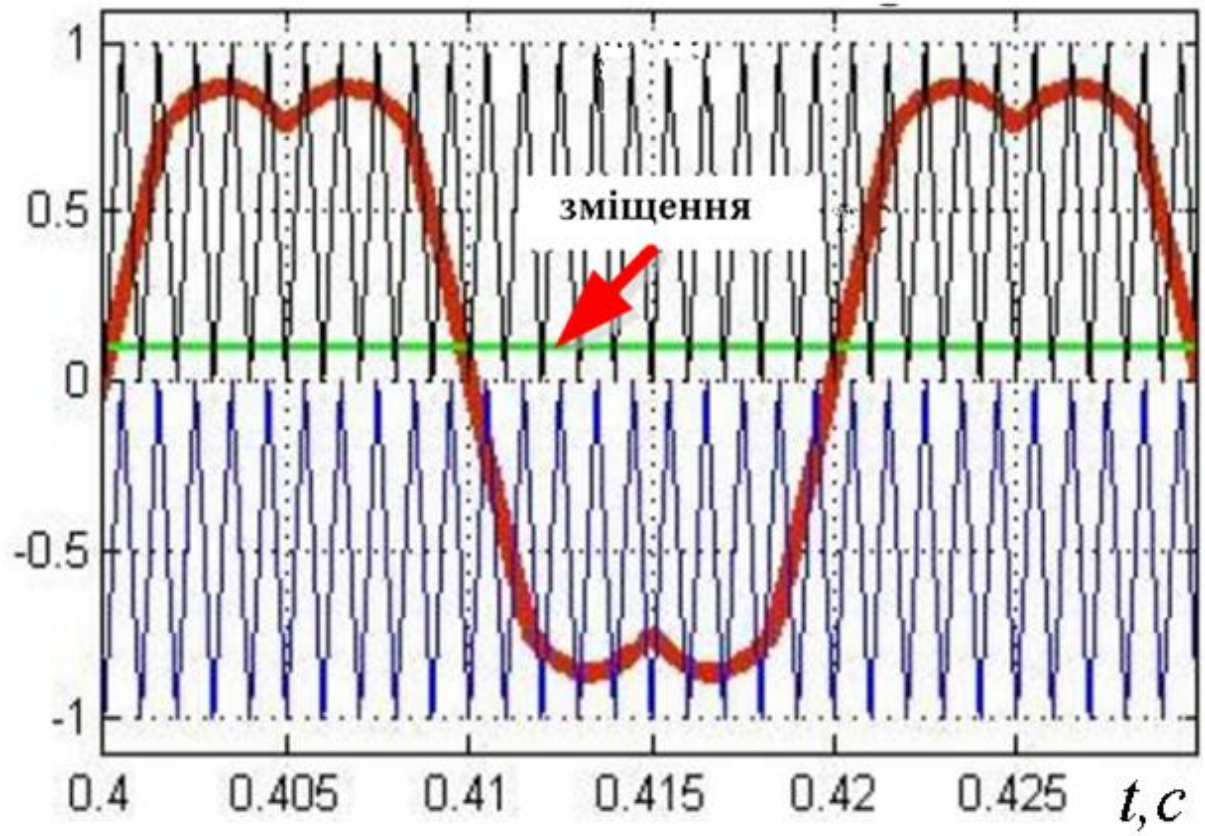
2.2. Розробка способу широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою

Застосування перервчастої комутації дозволяє знизити комутаційні втрати у структурі багаторівневого перетворювача у достатньо широкому діапазоні зміни струму навантаження.

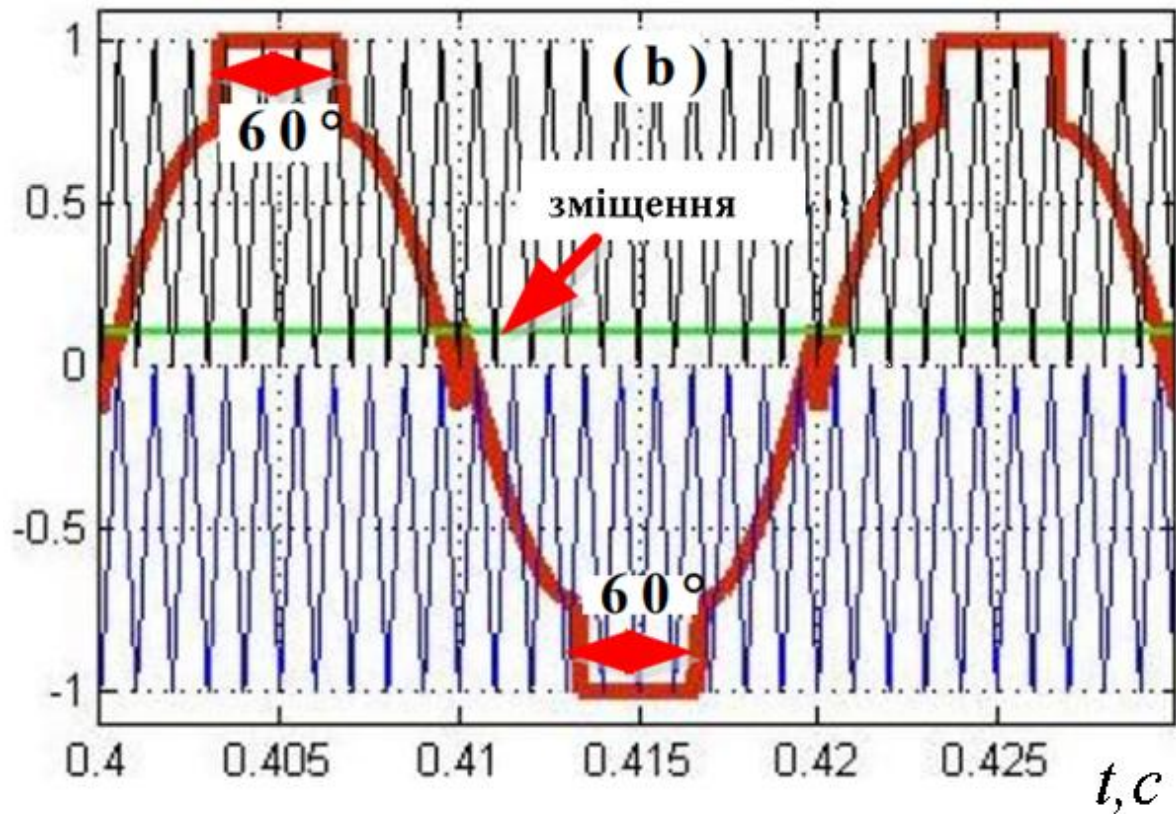
Для здійснення такого способу необхідним є забезпечення приєднання кожного з плечей структури перетворювача до джерела живлення різної полярності.

Таке застосування дозволяє використовувати для керування два різні опорні сигнали.

У просторовому представленні ці опорні сигнали мають зміщення один відносно іншого.



a)



б)

Рисунок 2.3 – Застосування перервчастої комутації, що дозволяє знизити комутаційні втрати у структурі багаторівневого перетворювача у достатньо широкому діапазоні зміни струму навантаження

Розрахункові рівняння:

$$\alpha = 1 - 0.5(1 + \text{sign}(\cos 3(\theta_{re} + \delta)));$$

$$u_z = 0.5u_{dc}(2\alpha - 1) - \alpha u_{max} + u_{min}(\alpha - 1)$$

де θ_{re} – кут повороту ротора,

u_{ac} – вхідна напруга,

u_{min} та u_{max} – мінімальна та максимальна напруга:

$$u_{min} = \min(u_a, u_b, u_c);$$

$$u_{max} = \max(u_a, u_b, u_c),$$

де u_a, u_b, u_c – напруга у фазах.

Формування сигналів:

$$u_{a_ref} = u_a + u_x;$$

$$u_{b_ref} = u_b + u_x;$$

$$u_{c_ref} = u_c + u_x.$$

Розділ 3. Дослідження ефективності способів широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою

3.1. Розробка математичного апарату для визначення ефективності способів широтно-імпульсної модуляції

Таким чином, аналіз що проведено у попередніх розділах, дозволяє зробити певні висновки щодо формування стратегії керування, що поєднана на використанні зазначених підходів та досвіду перервчастого та векторного способу керування роботою ключових елементів у багаторівневій структурі перетворювача.

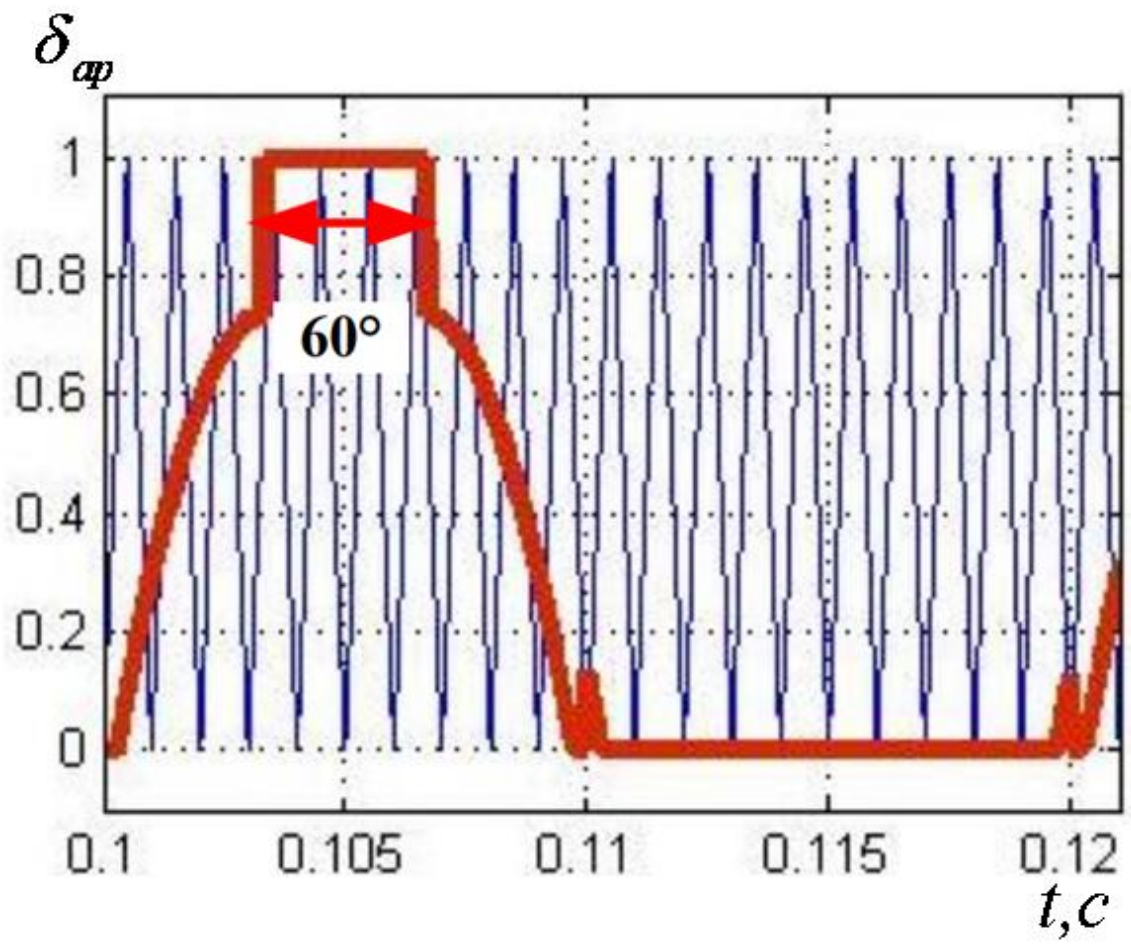
Новий підхід щодо керування роботою ключових елементів у багаторівневій структурі перетворювача засновано на фіксації значень відносно нульової точки.

Представимо розрахункові рівняння:

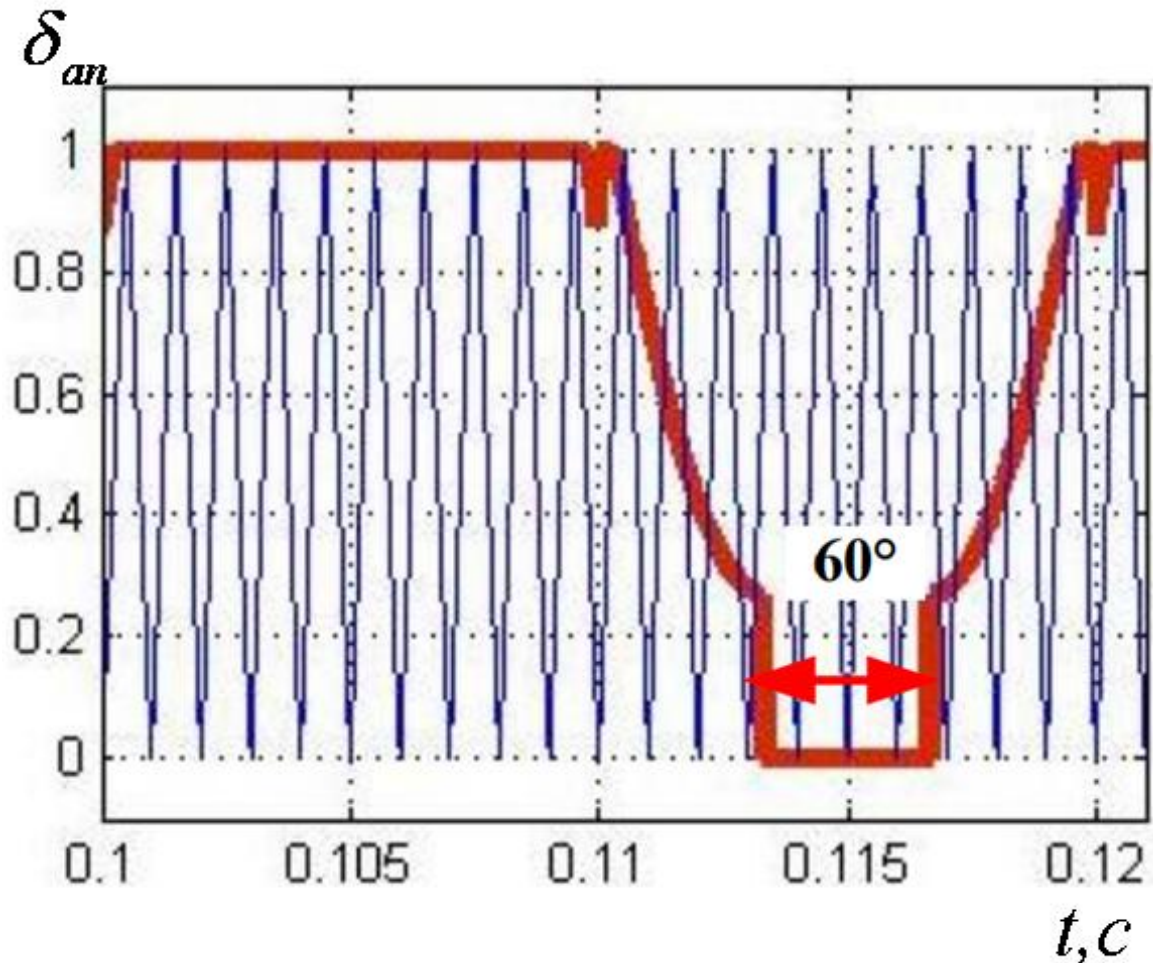
$$\delta_{ap} = \begin{cases} \frac{u_{a_{ref}}}{0.5u_{dc}}, & \text{якщо } u_{a_{ref}} > 0; \\ 0, & \text{якщо } u_{a_{ref}} \leq 0; \end{cases}$$

$$\delta_{an} = \begin{cases} \frac{u_{a_{ref}}}{0.5u_{dc}} + 1, & \text{якщо } u_{a_{ref}} < 0; \\ 1, & \text{якщо } u_{a_{ref}} \geq 0. \end{cases}$$

Отримаємо наступні сигнали:



a)



б)

Рисунок 3.1 – Застосування перервчастої комутації, що поєднана на використанні зазначених підходів та досвіду перервчастого та векторного способу керування роботою ключових елементів у багаторівневій структурі перетворювача, що дозволяє знизити комутаційні втрати у структурі багаторівневого перетворювача у достатньо широкому діапазоні зміни струму навантаження

Як можна бачити, така щільність розподілу сигналу не може забезпечити відсутність гармонійних складових.

Це стає неможливим унаслідок наявності відхилення напруги у нульовій точці багаторівневого перетворювача.

Тому для можливості відтворення необхідного балансу напруги у нульовій точці багаторівневого перетворювача слід застосовувати спеціальний алгоритм синтезу задаючих сигналів, що буде враховувати щільність розподілу сигналів та забезпечить відсутність різниці напруги у нульовій точці багаторівневої структури перетворювача та наявність гармонійних складових у формі сигналу.

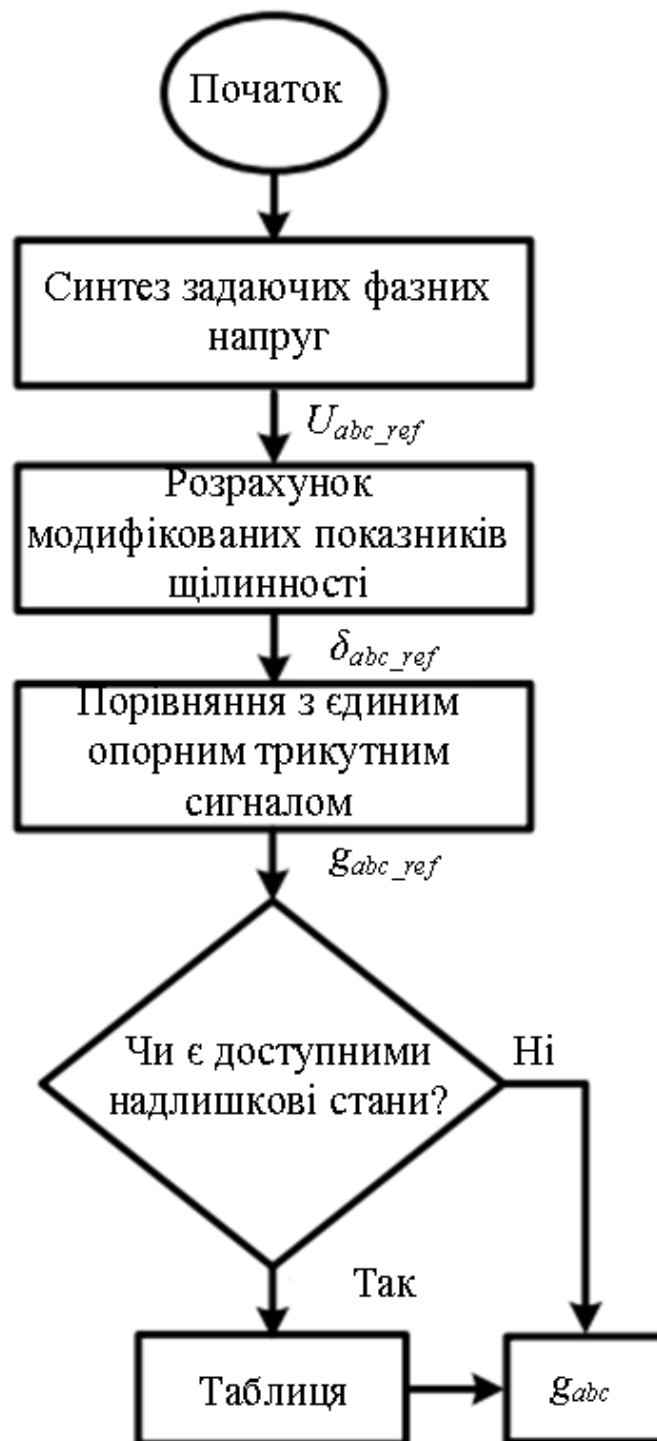


Рисунок 3.2 – Алгоритм синтезу задаючих сигналів, що буде враховувати щільність розподілу сигналів та забезпечить відсутність різниці напруги у нульовій точці багаторівневої структури перетворювача та наявність гармонійних складових у формі сигналу

Таблиця істинності векторів може бути представлена:

Таблиця 3.1 – Таблиця істинності векторів

Надлишкові стани	Умова балансування	Комбінація включення
POO	$u_{dc1} > u_{dc2}$	POO
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	ONN
ONN	$u_{dc1} > u_{dc2}$	POO
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	ONN
PPO	$u_{dc1} > u_{dc2}$	PPO
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	OON
OON	$u_{dc1} > u_{dc2}$	PPO
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	ONN
OPO	$u_{dc1} > u_{dc2}$	OPO
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	NON
NON	$u_{dc1} > u_{dc2}$	OPO
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	NON
OPP	$u_{dc1} > u_{dc2}$	OPP
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	NOO
NOO	$u_{dc1} > u_{dc2}$	OPP
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	NOO
OOP	$u_{dc1} > u_{dc2}$	OOP
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	NNO
NNO	$u_{dc1} > u_{dc2}$	OOP
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	NNO
POP	$u_{dc1} > u_{dc2}$	POP
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	ONO
ONO	$u_{dc1} > u_{dc2}$	POP
	$u_{dc2} > u_{dc1}$	ONO

Система регульованого електроприводу на базі керованого багаторівневого перетворювача, що засновано на розробці нового способу керування може бути представлена структурою, що містить ланку розрахунку комутаційних витрат.

Така структура дозволить формувати сигнали керування враховуючи комутаційну складову.

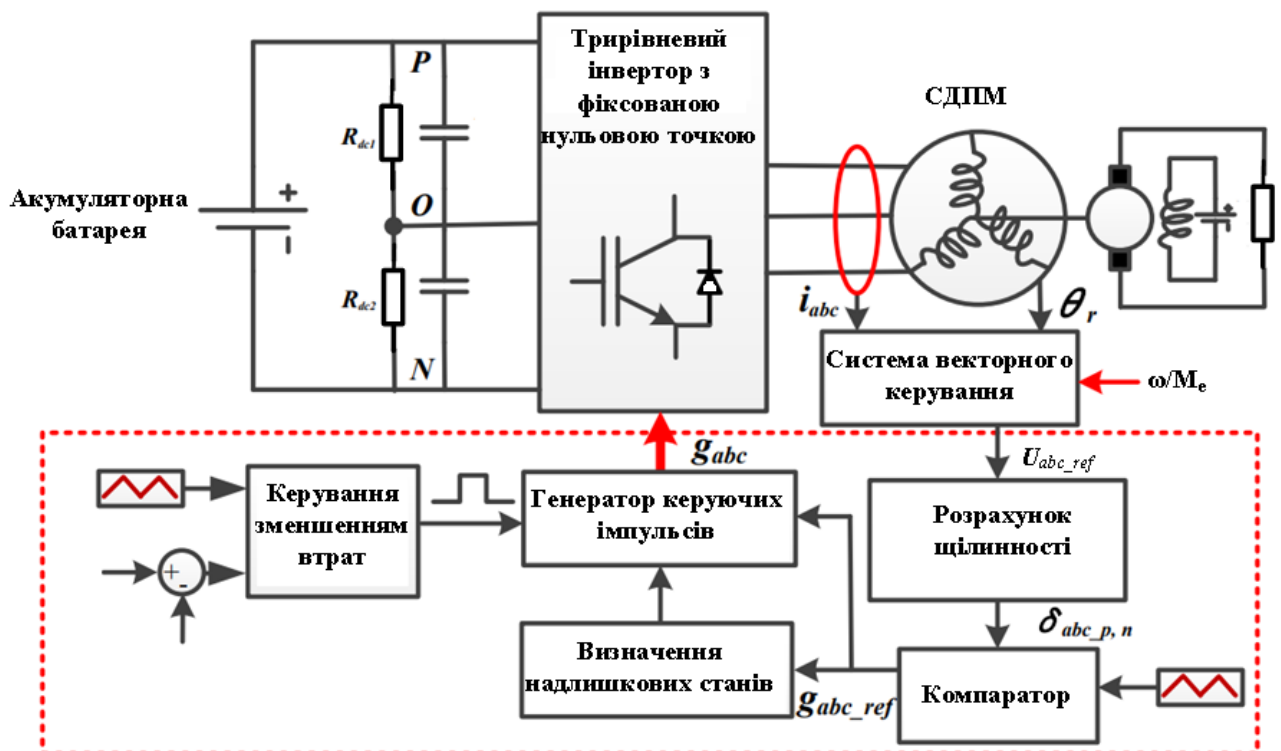
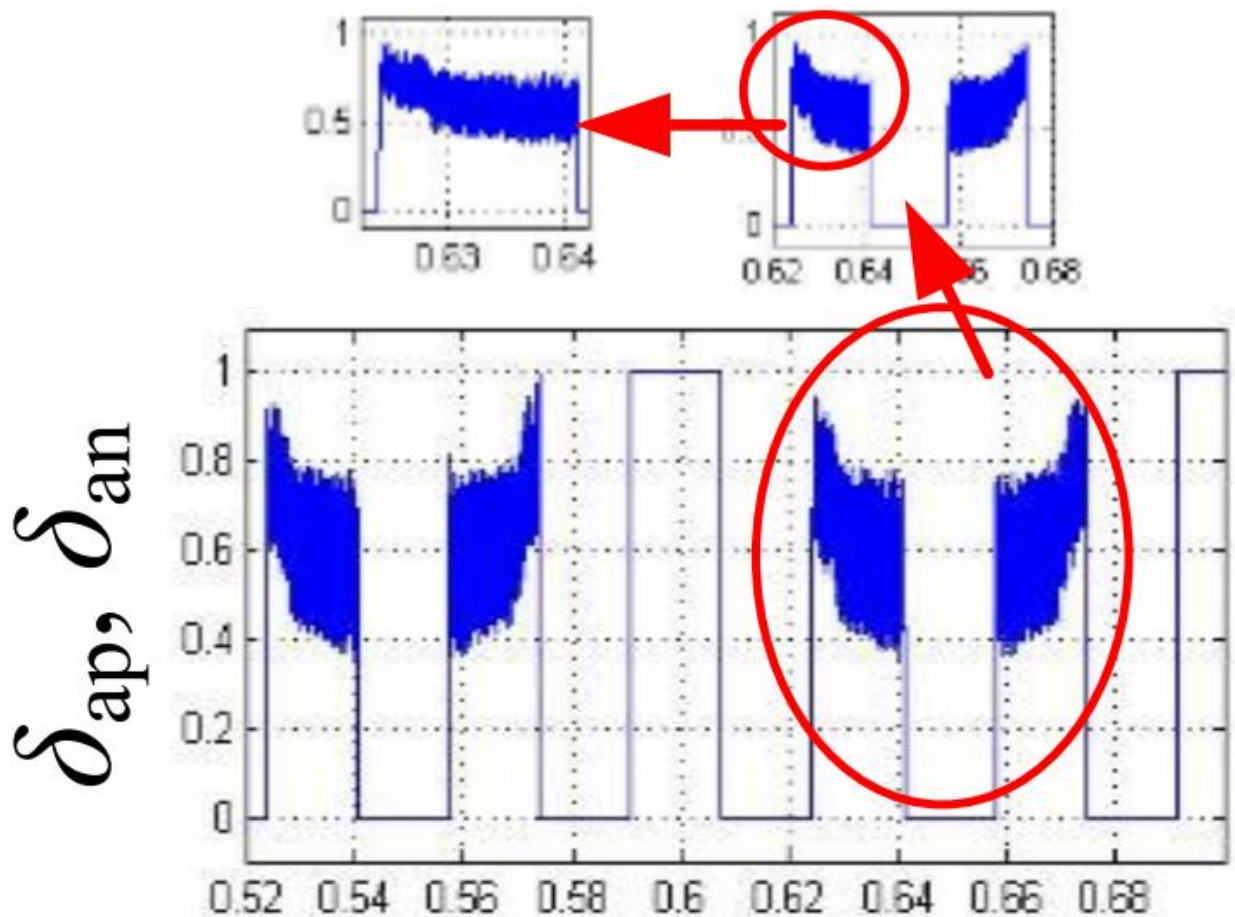


Рисунок 3.3 – Система регульованого електроприводу на базі керованого багаторівневого перетворювача, що засновано на розробці нового способу керування може бути представлена структурою, що містить ланку розрахунку комутаційних витрат

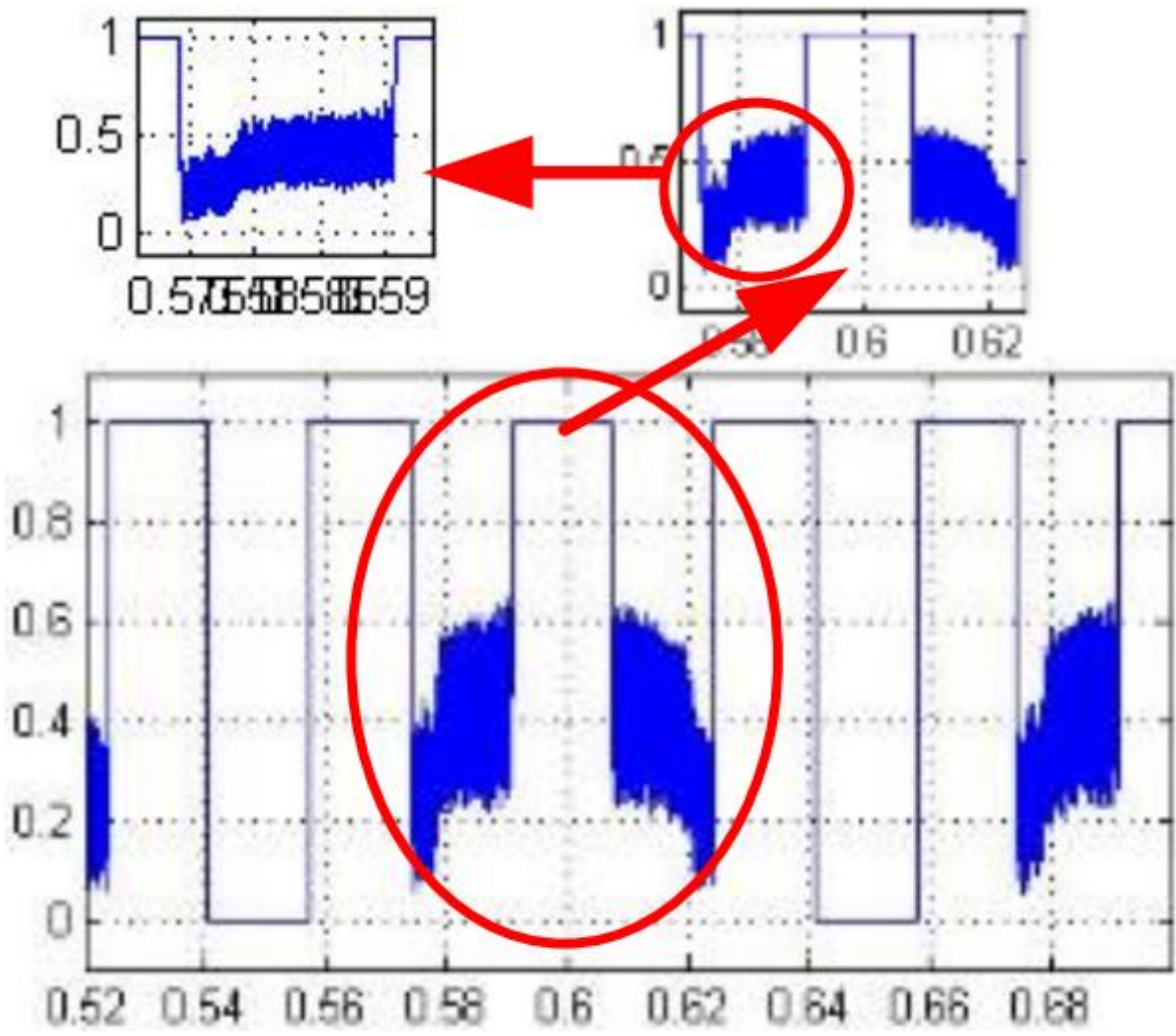
3.2. Дослідження перехідних процесів у структурі трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою

Для визначення працездатності розглянутого запропонованого підходу щодо формування нового підходу до розробки способу керування трирівневим перетворювачем необхідно провести дослідження перехідних процесів, що характеризуватимуть ефективність його роботи у різних режимах.

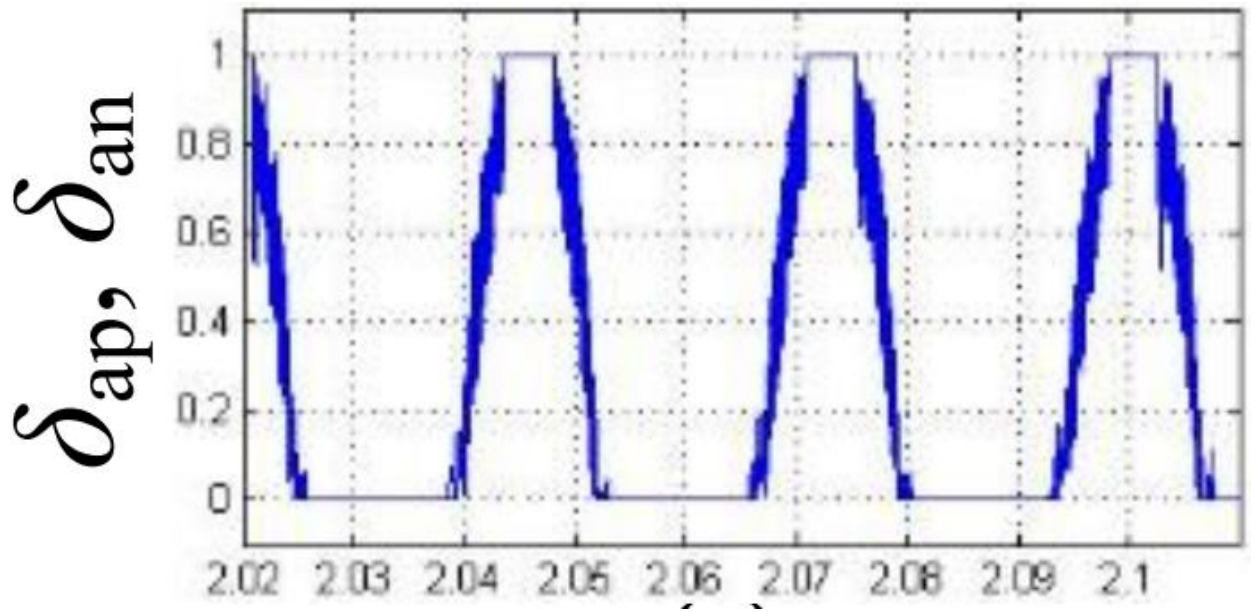
Результати дослідження представлені у вигляді наступних графіків:



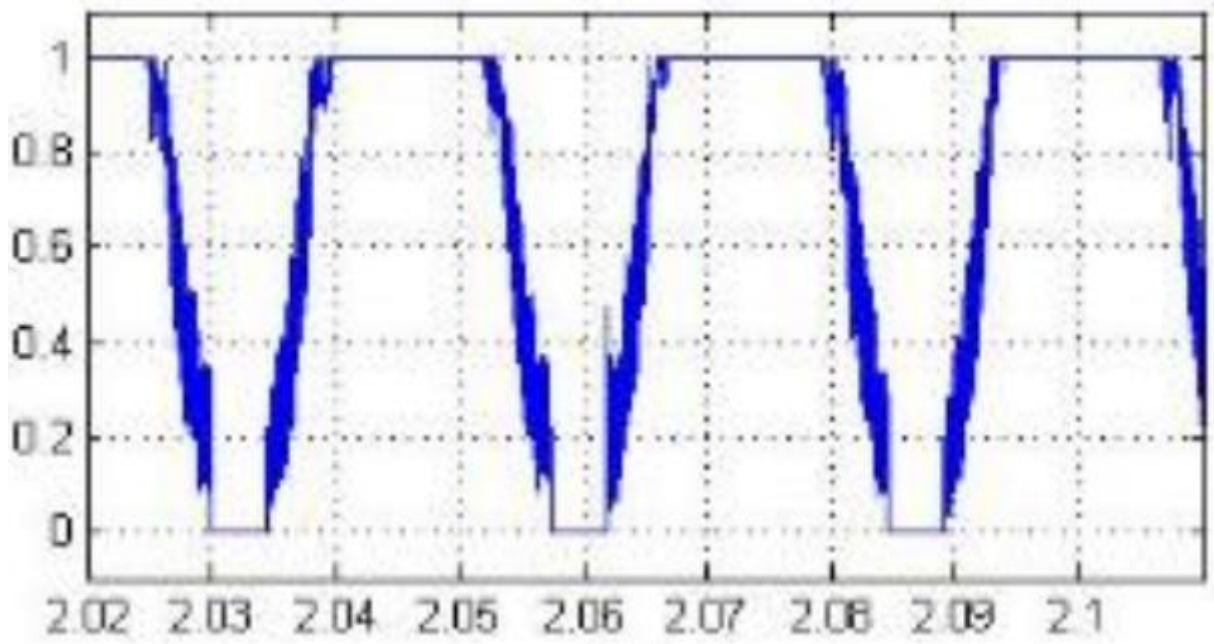
a)



6)



B)

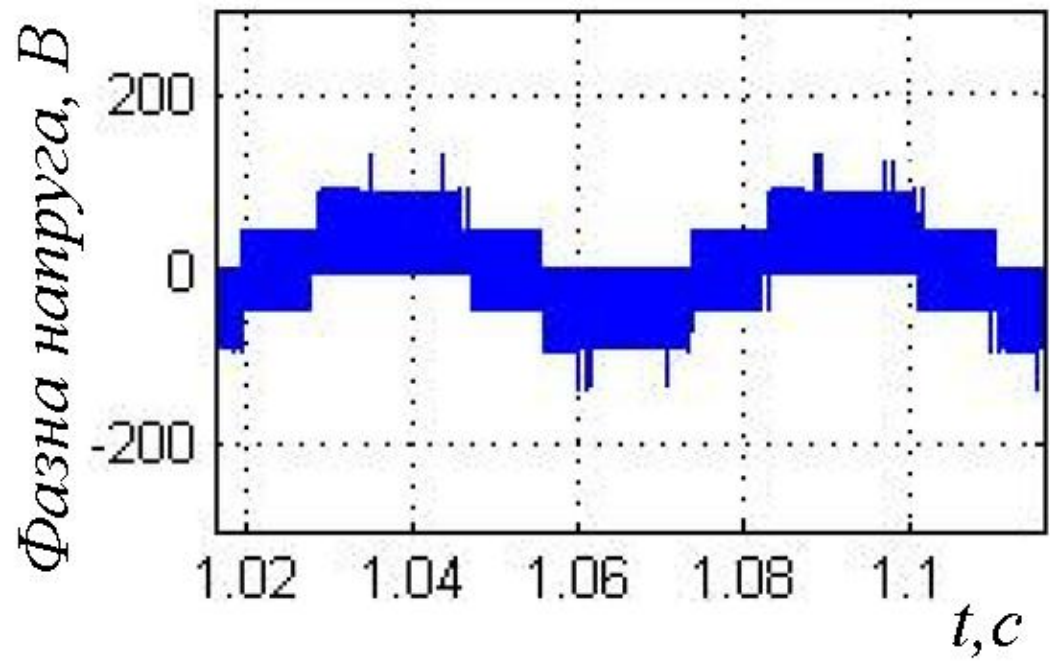


г)

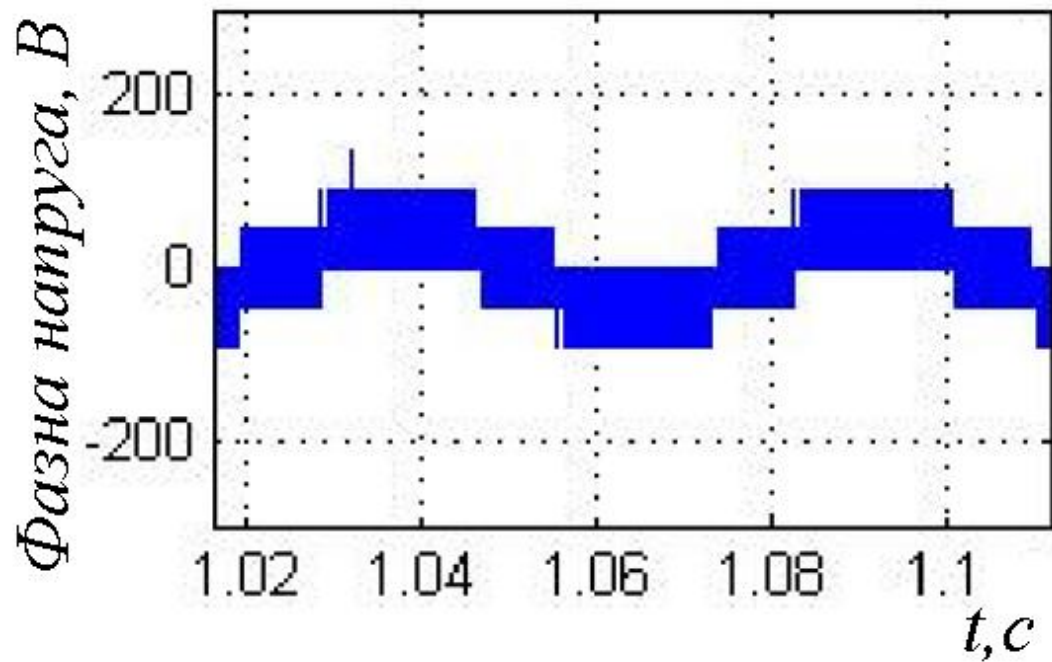
Рисунок 3.4 – Дослідження перехідних процесів, щодо формування нового підходу до розробки способу керування трирівневим перетворювачем, що характеризуватимуть ефективність його роботи та визначення працездатності розглянутого запропонованого підходу у різних режимах



Рисунок 3.5 – Дослідження перехідних процесів, щодо формування нового підходу до розробки способу керування трирівневим перетворювачем, що характеризуватимуть ефективність його роботи та визначення працездатності розглянутого запропонованого підходу у режимах з модульованим сигналом: а) 0.23; в) 0.87

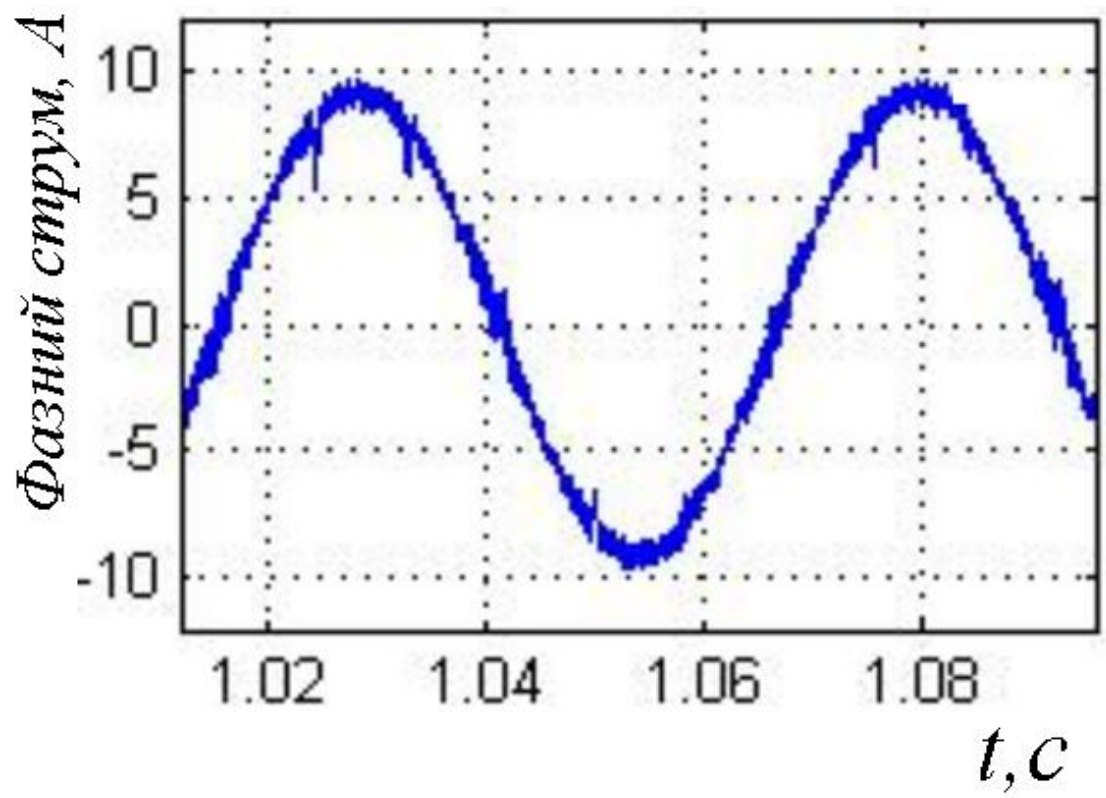


a)

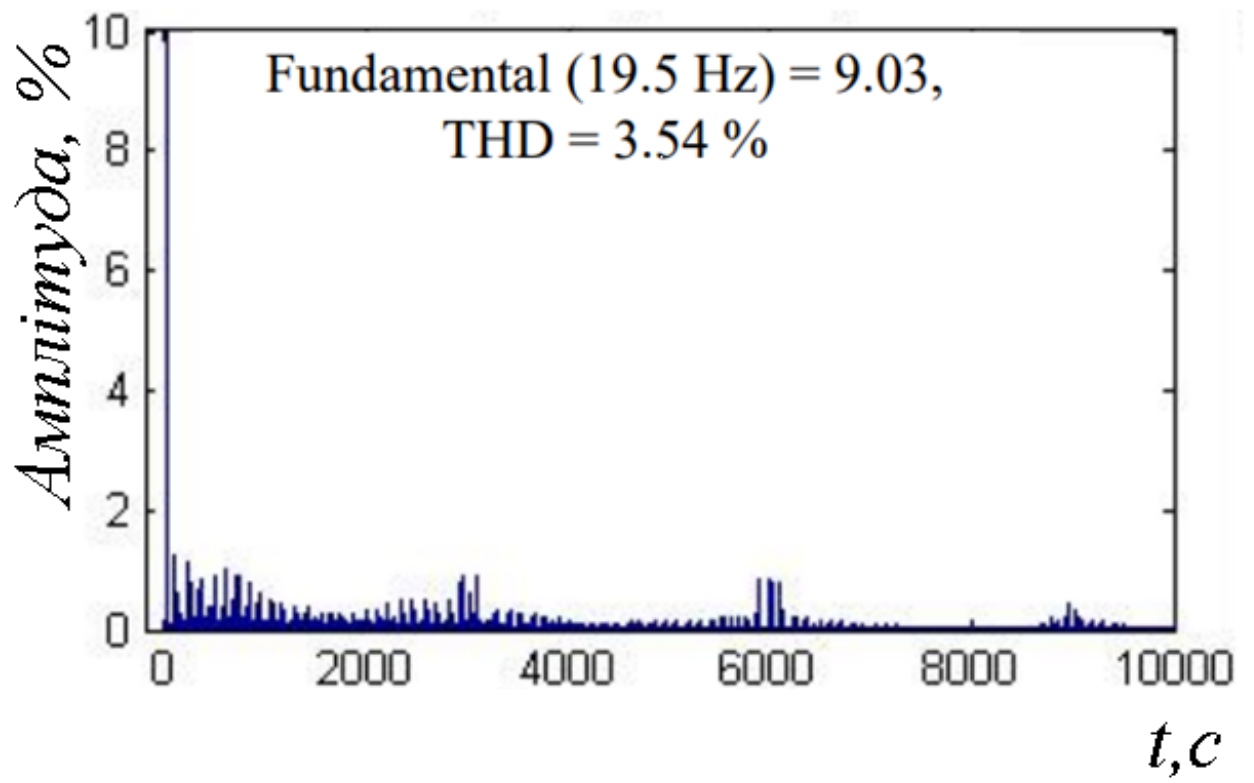


б)

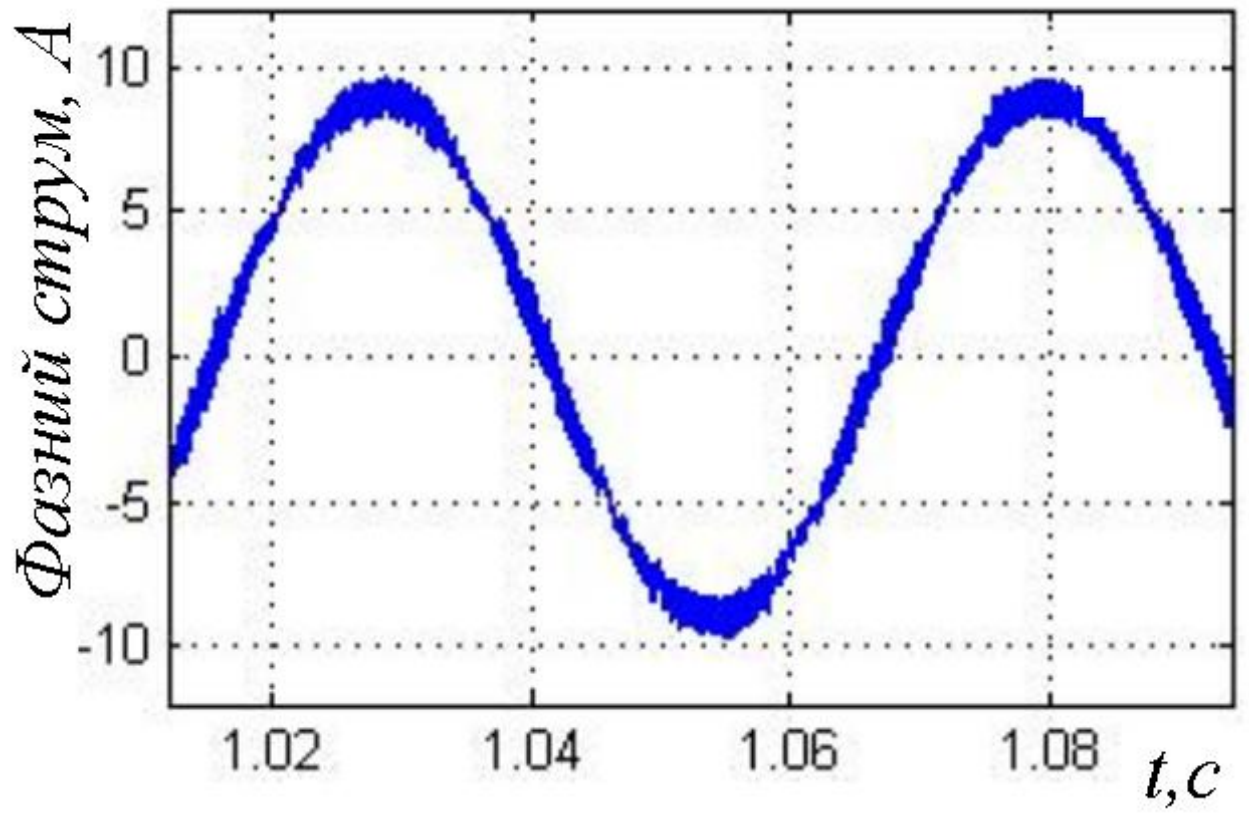
Рисунок 3.6 – Порівняльний аналіз, щодо формування нового підходу до розробки способу керування трирівневим перетворювачем, що характеризуватимуть ефективність його роботи та визначення працездатності розглянутого запропонованого підходу у звичайному та запропонованому режимах модулювання сигналу



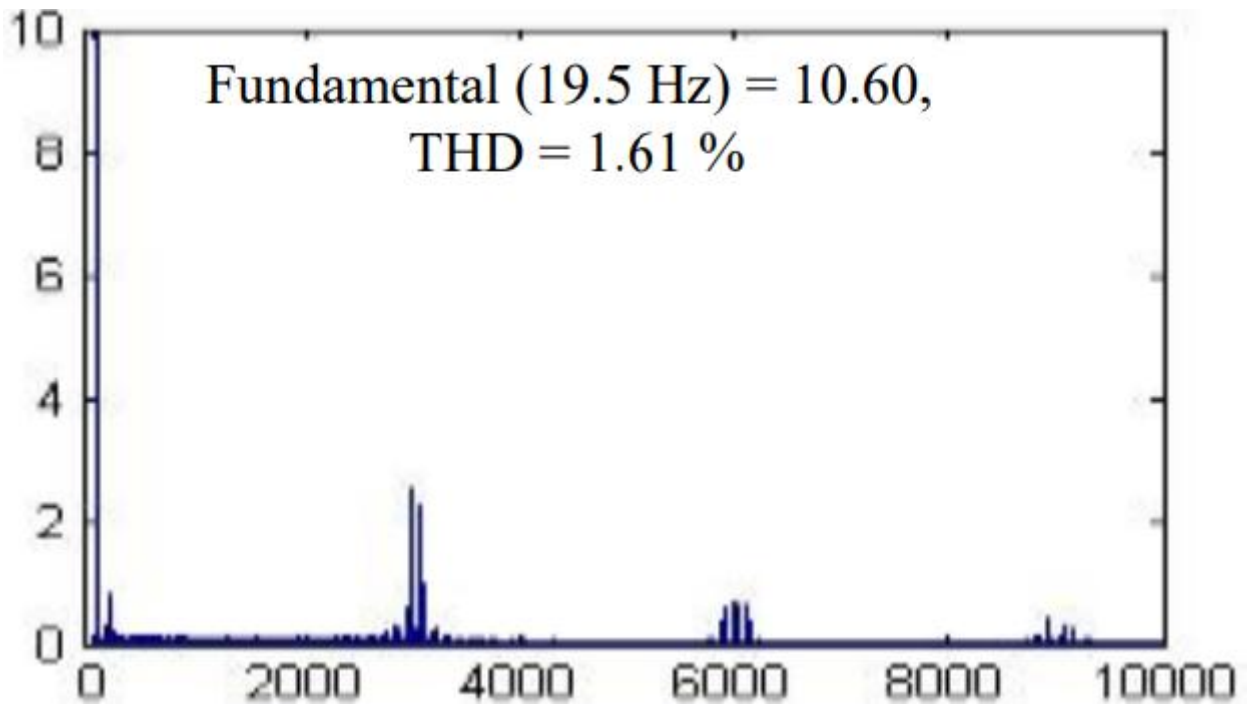
a)



б)

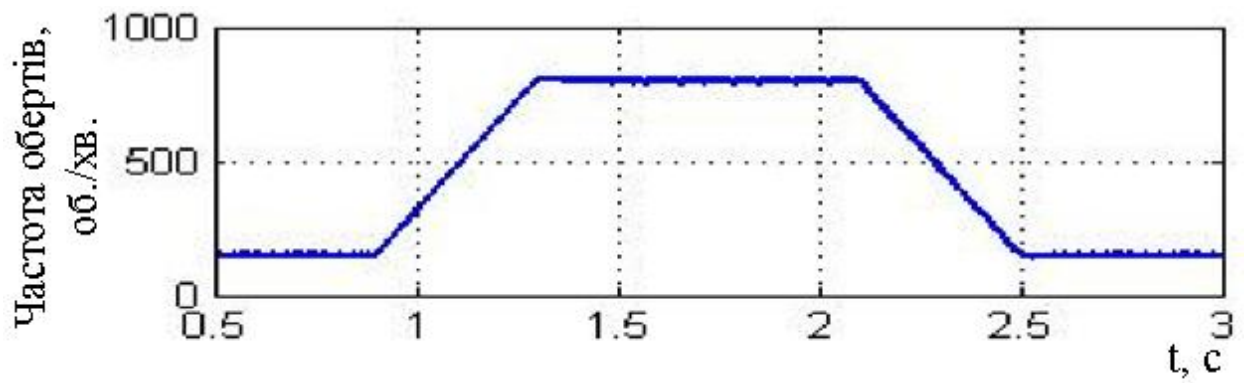


в)

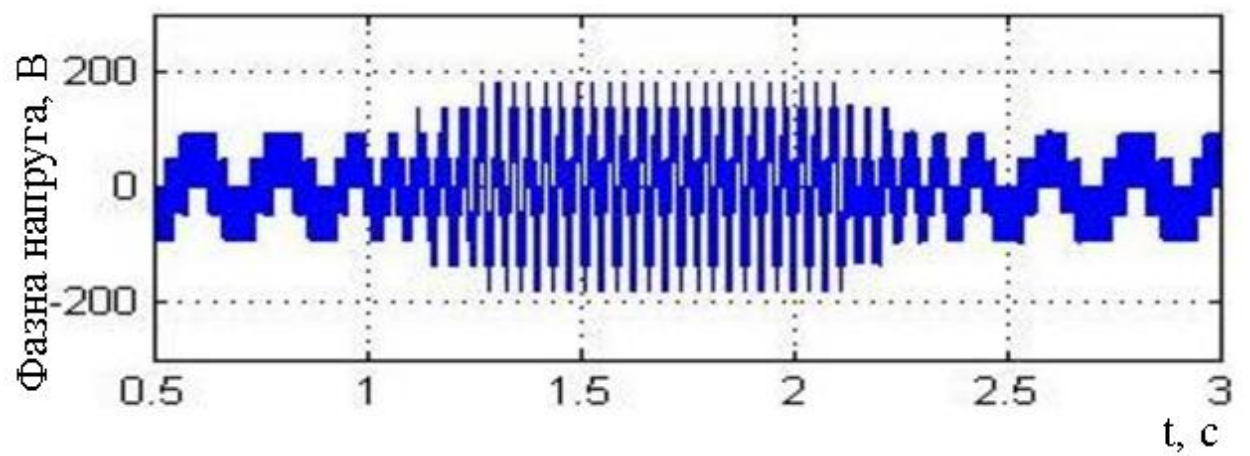


г)

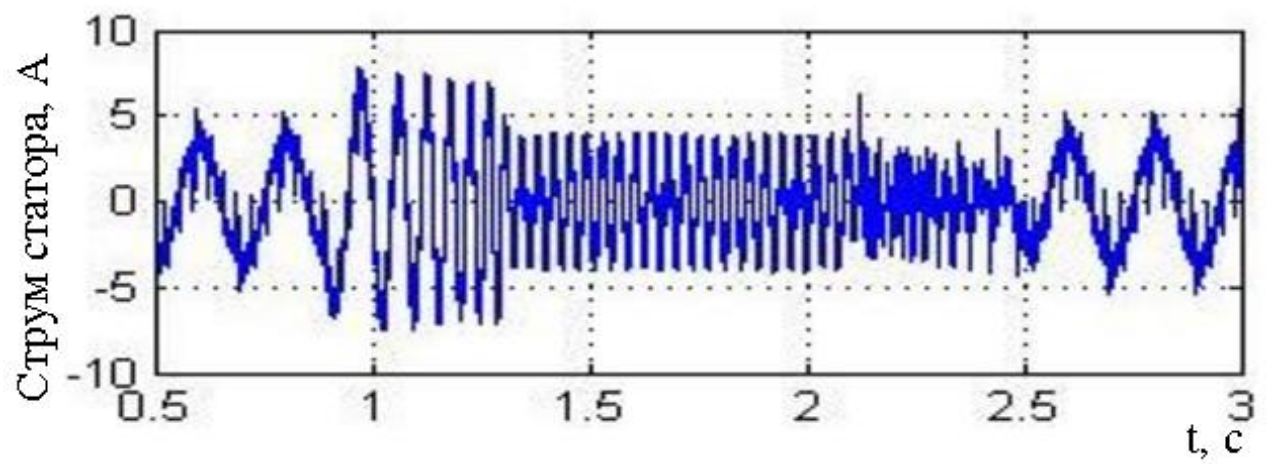
Рисунок 3.7 – Порівняльний аналіз, щодо формування нового підходу до розробки способу керування трирівневим перетворювачем, що характеризуватимуть ефективність його роботи та визначення працездатності розглянутого запропонованого підходу у звичайному та запропонованому режимах модулювання сигналу з розподілом на гармонійні складові



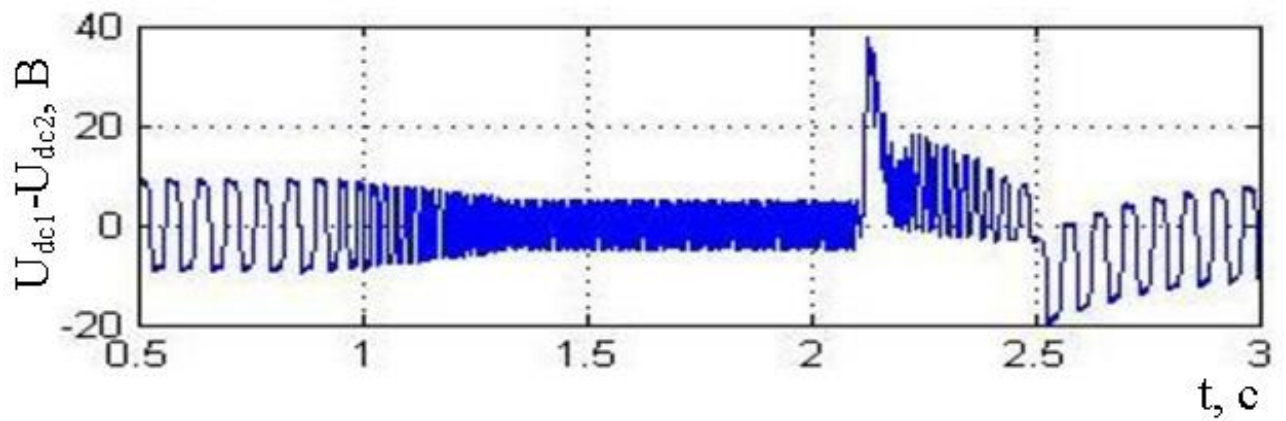
a)



б)

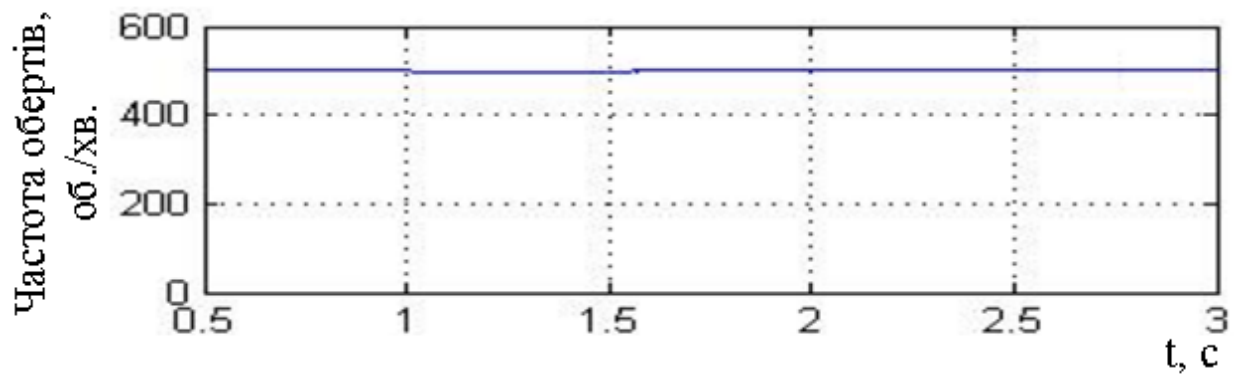


в)

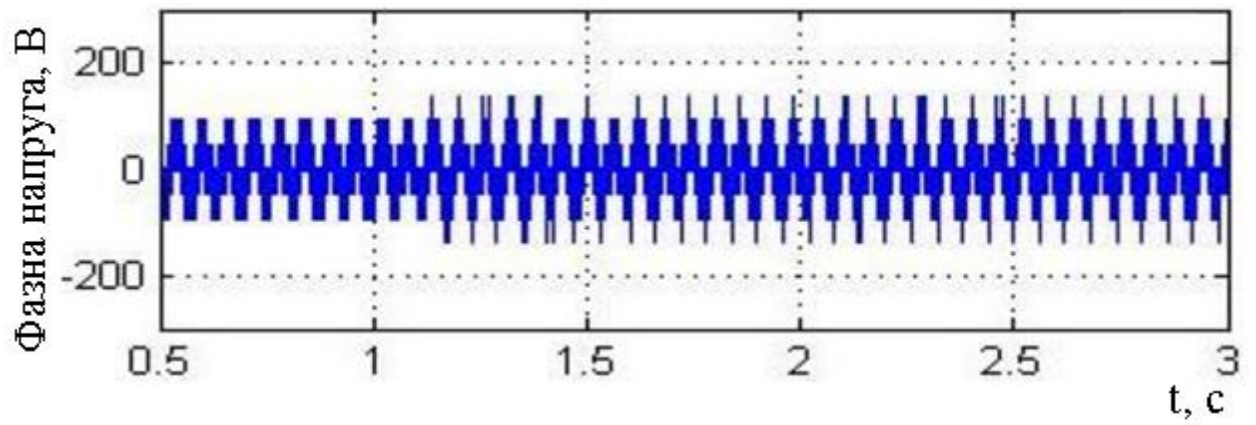


г)

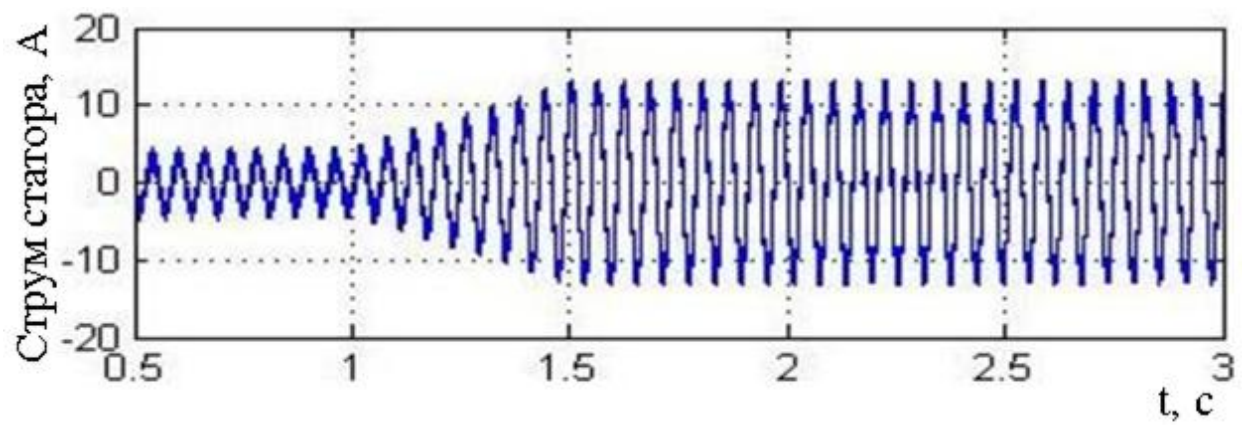
Рисунок 3.8 – Дослідження перехідних процесів у структурі системи регульованого електроприводу з використанням трирівневого керованого перетворювача із застосуванням запропонованого способу комутації ключових елементів перетворювача, що базується на використуванні алгоритму формування сигналів при поєднанні переважного способу керування з представленням різницевих значень напруги у нульовій точці структури багаторівневого перетворювача у векторній формі



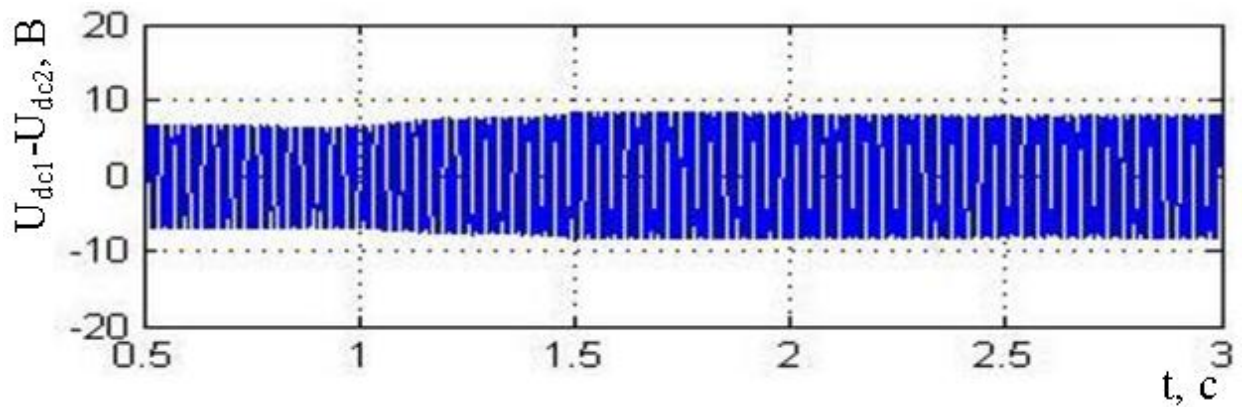
a)



б)

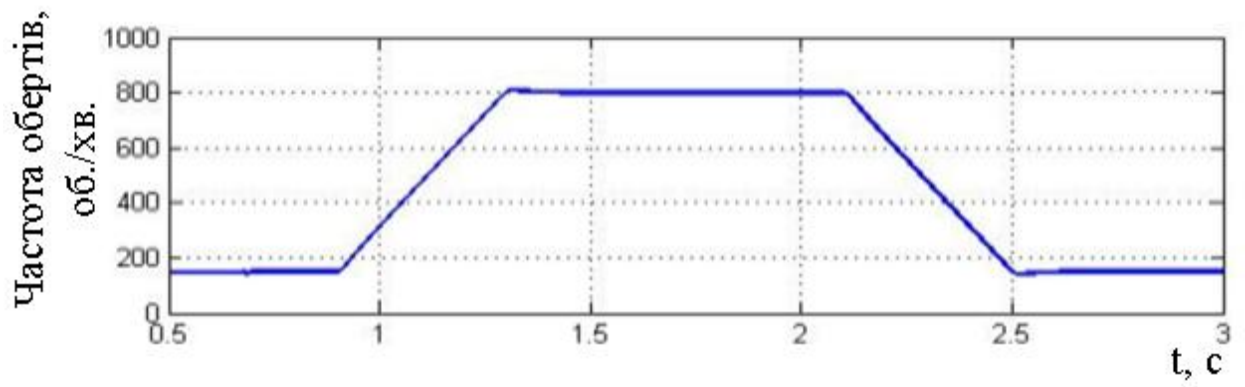


в)

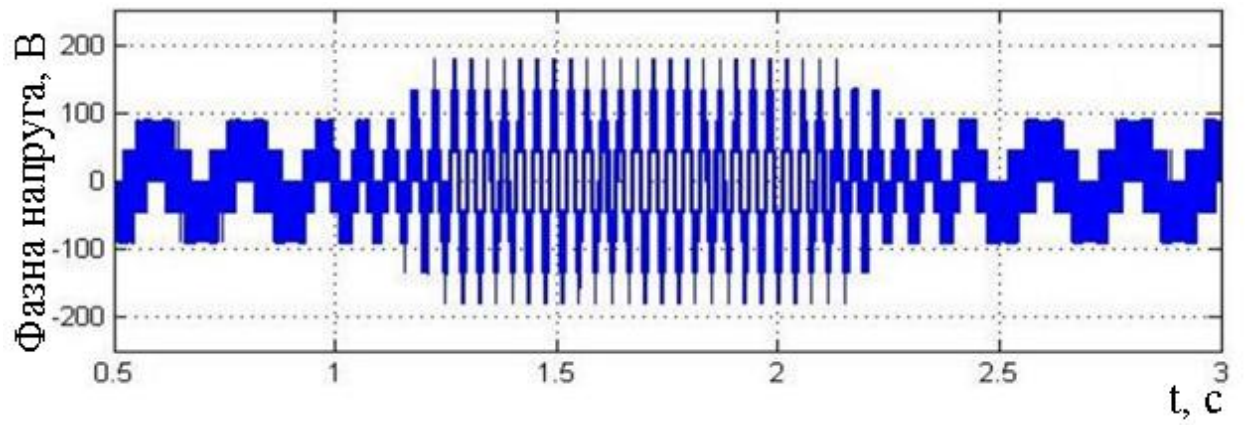


г)

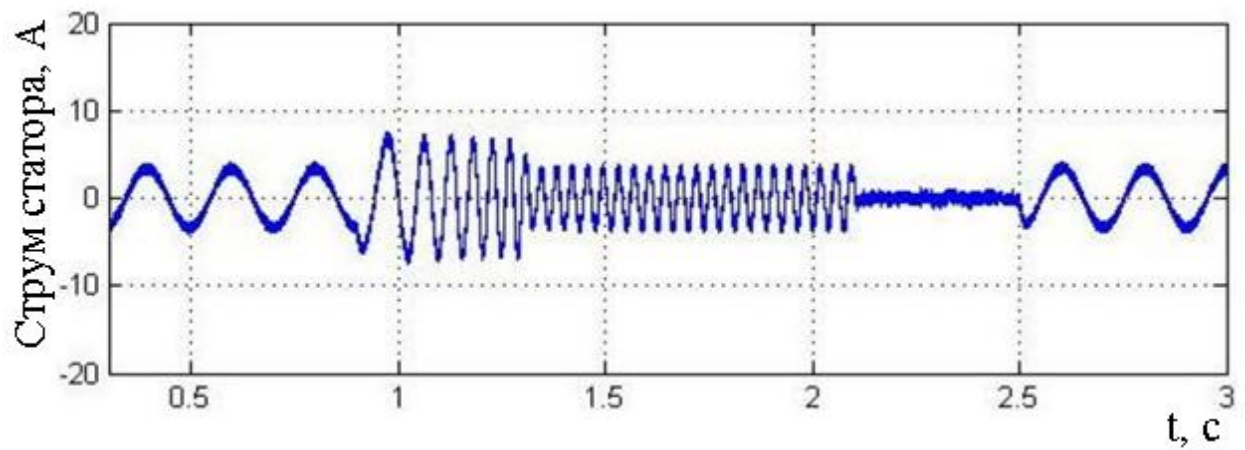
Рисунок 3.9 – Дослідження перехідних процесів у структурі системи регульованого електроприводу з використанням трирівневого керованого перетворювача із застосуванням запропонованого способу комутації ключових елементів перетворювача, що базується на використуванні алгоритму формування сигналів при поєднанні переважного способу керування з представленням різницевих значень напруги у нульовій точці структури багаторівневого перетворювача у векторній форм при зміні режиму роботи



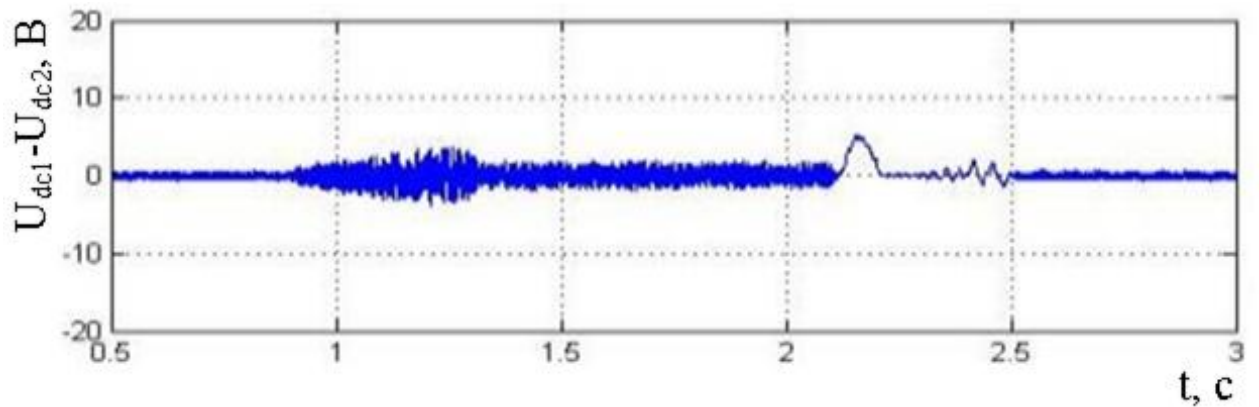
a)



б)

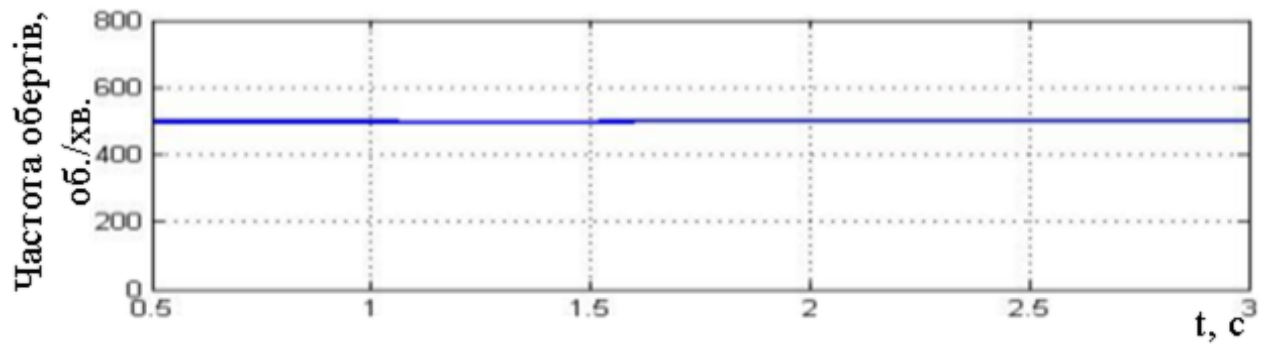


в)

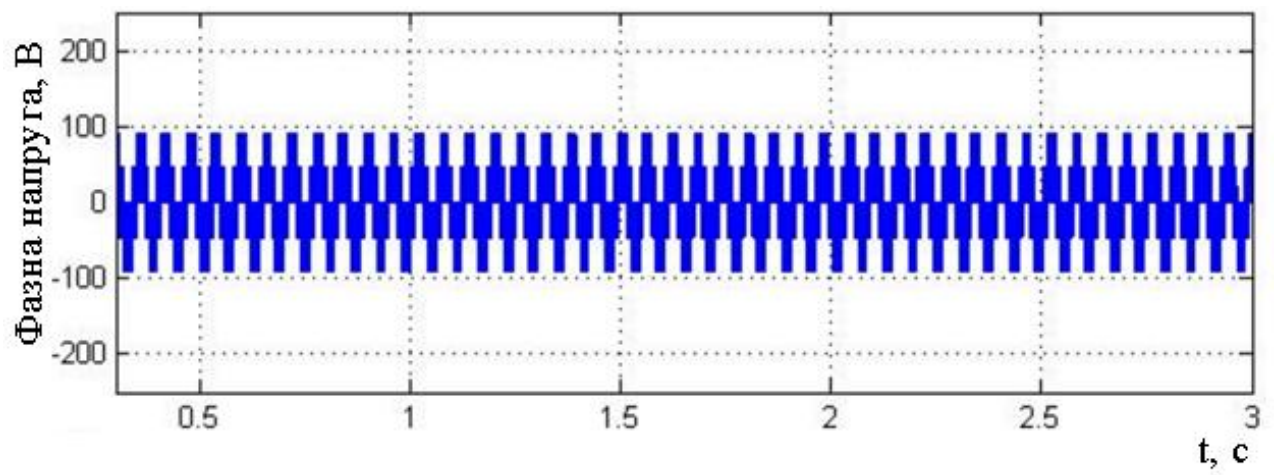


г)

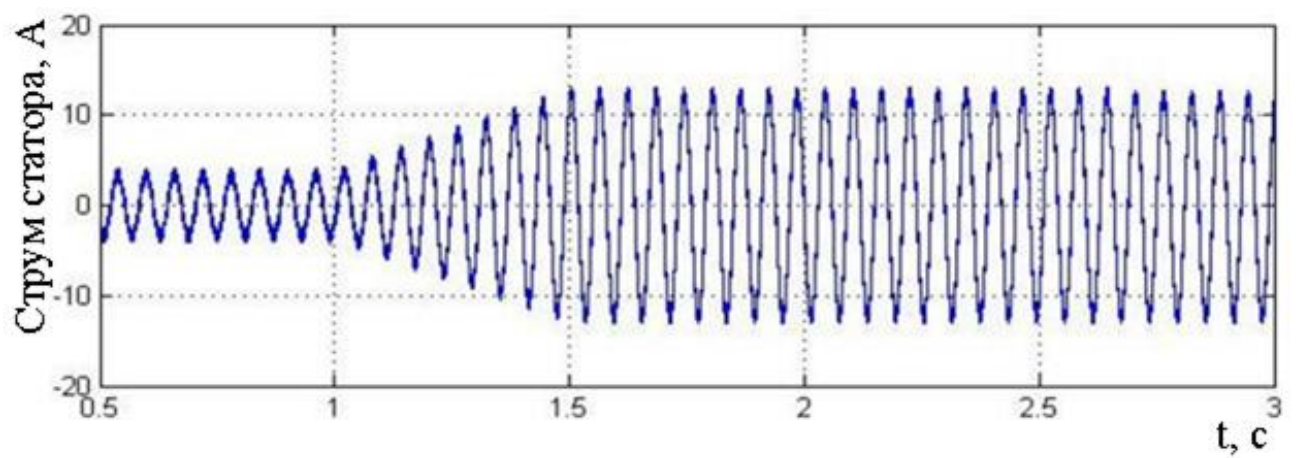
Рисунок 3.10 – Дослідження перехідних процесів у структурі системи регульованого електроприводу з використанням трирівневого керованого перетворювача із застосуванням запропонованого способу комутації ключових елементів перетворювача, що базується на використуванні алгоритму формування сигналів при поєднанні перевчастого способу керування з представленням різницевих значень напруги у нульовій точці структури багаторівневого перетворювача у векторній форм для роботи при низьких частотах



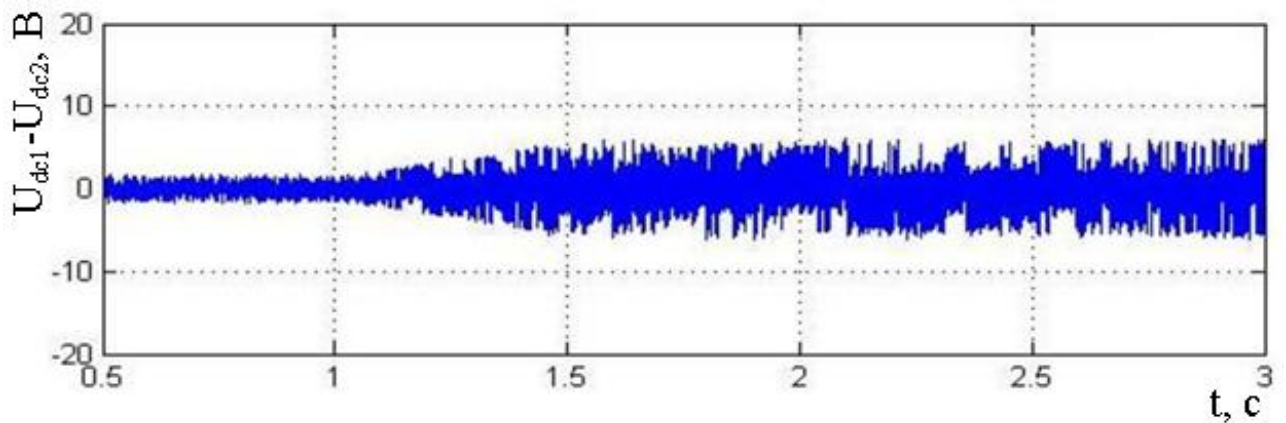
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.11 – Дослідження перехідних процесів у структурі системи регульованого електроприводу з використанням трирівневого керованого перетворювача із застосуванням запропонованого способу комутації ключових елементів перетворювача, що базується на використуванні алгоритму формування сигналів при поєднанні переважного способу керування з представленням різницевих значень напруги у нульовій точці структури багаторівневого перетворювача у векторній форм при встановлених обмеженнях

Висновки

У роботі було розглянуто трирівневий інвертор з фіксованою нульовою точкою.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела, та досліджено існуючі способи широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою.

У другому розділі представлена структура трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою.

Запропоновано спосіб широтно-імпульсної модуляції для розглянутої структури.

У третьому розділі досліджено ефективність запропонованого способу широтно-імпульсної модуляції для трирівневого інвертора з фіксованою нульовою точкою.

Дослідження встановили, що запропонований спосіб широтно-імпульсної модуляції зменшує втрати у трирівневому інверторі.