

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Модернізація частотно-регульованого електроприводу для забезпечення безперебійної роботи у розподільчій мережі підприємства»

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Дейнеко В.М. Дейнеко

(прізвище та ініціали)

Керівник Сільвестров А.М. Сі

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.


(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
 робототехніки
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти Бакалавр
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматки,
 електроніки та телекомунікацій


 О.В. Шефер
 «01» квітня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

Дейнеку Володимиру Максимовичу

1. Тема роботи «Модернізація частотно-регульованого електроприводу для забезпечення безперебійної роботи у розподільчій мережі підприємства»
 керівник роботи Сільвестров Антон Миколайович, д.т.н., професор
 затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03.2025 року № 306/1-ф.а.
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) діючі значення напруг трифазної мережі знаходяться в межах 10% від номінальної напруги $U_{ном}$ мережі.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Методи ідентифікації провалів напруги і боротьби з ними. 2. Несиметричні режими мережі живлення і визначення їх параметрів. 3. Предиктивне визначення параметрів напруги ланки постійного струму асинхронного електроприводу з пасивним випрямлячем при провалах напруги. 4. Моделювання впливу провалів напруги різного типу на напруги ланки постійного струму електроприводу з векторним керуванням. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 1. Динаміка зміни чинного значення напруги в одній із фаз трифазної мережі при провалі напруги.
 2. Компоненти прямої та зворотної послідовності годографа узагальненого вектора трифазної мережі.
 3. Годограф узагальненого вектора напруги.
 4. Структура перетворювача частоти з пасивним шестипульсним випрямлячем та інвертором напруги.
 5. Структура моделі асинхронного електроприводу з векторним керуванням.
 6. Контури регулювання швидкості та струму.

7. Зміна механічних параметрів приводу
8. Струм та напруга ЛПС приводу під навантаженням при нормальній нарузі.
9. Струм і напруга ЛПС приводу під навантаженням під час провалу напруги.
10. Графіки.

6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Методи ідентифікації провалів напруги і боротьби з ними	22.04.25	I	20%	Пл. 1
2	Несиметричні режими мережі живлення і визначення їх параметрів	08.05.25		40%	Пл. 2,3
3	Предиктивне визначення параметрів напруги ланки постійного струму асинхронного електроприводу з пасивним випрямлячем при провалах напруги	22.05.25	II	60%	Пл. 4,5
4	Моделювання впливу провалів напруги різного типу на напруги ланки постійного струму електроприводу з векторним керуванням	30.05.25		80 %	Пл. 6
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.25	III	100%	Пл. 7,8

Студент

Дейнеко Дейнеко В.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Сільвестров Сільвестров А.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра

«Модернізація частотно-регульованого електроприводу для забезпечення безперебійної роботи у розподільчій мережі підприємства»

Робота містить 57 сторінок, 22 літературних джерел і додатки на 10 арк.

Ключові слова: електропривод, перетворювач частоти, частотно-регульовані електроприводи.

В роботі пропонуються методи, що дозволяють електроприводу подолати провал напруги із збереженням режиму приводного механізму власними силами, без використання додаткових накопичувачів та перетворювачів. Результат досягається шляхом зміни стратегії управління перетворювачами у складі електротехнічного комплексу електроприводу. Залежно від глибини провалу напруги, можна продовжити роботу з поточною потужністю в режимі ослабленого поля, знизити споживану електроприводом потужність, або, без можливості продовжувати роботу, оптимізувати умови автоматичного повторного пуску пристрою.

ABSTRACT

of the bachelor's qualification work

"Modernization of a frequency-controlled electric drive to ensure uninterrupted operation in the distribution network of the enterprise"

The work contains 57 pages, 22 references and 10-sheet appendixes.

Keywords: electric drive, frequency converter, frequency-controlled electric drives.

The work proposes methods that allow the electric drive to overcome a voltage drop while maintaining the drive mechanism mode on its own, without using additional storage devices and converters. The result is achieved by changing the strategy for controlling the converters in the electrical complex of the electric drive. Depending on the depth of the voltage drop, it is possible to continue operation with the current power in the weakened field mode, reduce the power consumed by the electric drive, or, without the possibility of continuing operation, optimize the conditions for automatic restart of the device.

ЗМІСТ

	стор
Вступ	6
1. Методи ідентифікації провалів напруги і боротьби з ними	9
1.1. Провали напруги в електричних мережах з точки зору показників та норм якості електричної енергії	9
1.2. Частота виникнення провалів напруги в електричних мережах ...	10
1.3. Класифікація провалів напруги	10
1.4. Вплив провалів напруги на електропривод як елемент безперервного виробничого процесу.....	13
1.5. Методи боротьби з провалами напруги у мережах промислових підприємств.....	16
1.6. Методи подолання провалів напруги засобами електроприводу..	19
1.7. Методи реєстрації провалів напруги.....	23
2. Несиметричні режими мережі живлення і визначення їх параметрів ...	28
2.1. Узагальнені вектори трифазної мережі	28
2.2. Властивості узагальнених векторів трифазної мережі в симетричному та несиметричному режимах	29
2.3. Канонічні системи координат та їх властивості.....	32
2.4. Властивість сталості площ секторів, пройдених узагальненим вектором за рівні проміжки часу, в встановлених режимах	33
2.5. Модернізований алгоритм визначення параметрів годографа узагальненого вектора напруги.....	37
2.6. Отримання миттєвих значень напруги за даними про годограф узагальненого вектора напруги.....	40
3. Предиктивне визначення параметрів напруги ланки постійного струму асинхронного електроприводу з пасивним випрямлячем при провалах напруги	42
3.1. Некерований випрямляч у структурі сучасного електроприводу	42
3.2. Розрахунок параметрів напруги ланки постійного струму під час провалів напруги	44
3.3. Моделювання впливу провалів напруги різного типу на напруги ланки постійного струму електроприводу з векторним керуванням	46
Висновки.....	55
Література.....	56
Додатки.....	58

ВСТУП

Провал напруги – це короткочасне зниження чинного значення напруги мережі живлення не нижче 5% від номінального значення, тривалістю до двох секунд. За даними світової статистики в розподільчих мережах підприємств переважають провали напруги глибиною не менше 20% величини напруги живлення і тривалістю порядку сотень мілісекунд, що становить кілька періодів напруги живлення.

Невід'ємною частиною сучасних промислових підприємств із безперервним виробничим процесом, у тому числі підприємств гірничої промисловості, є технологічні установки з частотно-регульованим електроприводом (ЧРП). Короткочасні зниження напруги часто призводять до переривання їх роботи та простою обладнання, що тягне за собою брак та недовипуск продукції. У деяких випадках аварійна зупинка може призвести до пошкодження установки.

Для вирішення проблеми пропонується:

- оптимізувати топологію розподільчої мережі зниження впливу явищ, що знижують якість електроенергії, на комплекс технологічного устаткування;
- переводити відповідальних споживачів живлення від власних генераторів;
- встановлювати у розподільчу мережу підприємства пристрої, що забезпечують динамічну компенсацію провалів напруги;
- підключати накопичувачі електроенергії до відповідальних вузлів електромережі підприємства;
- включати накопичувачі електроенергії безпосередньо до складу вразливих ЧРП.

Також пропонуються методи, що дозволяють електроприводу подолати провал напруги із збереженням режиму приводного механізму власними силами, без використання додаткових накопичувачів та перетворювачів. Результат досягається шляхом зміни стратегії управління перетворювачами у

складі електротехнічного комплексу електроприводу. Залежно від глибини провалу напруги, можна продовжити роботу з поточною потужністю в режимі ослабленого поля, знизити споживану електроприводом потужність, або, без можливості продовжувати роботу, оптимізувати умови автоматичного повторного пуску пристрою.

Для успішної реалізації стратегій управління, які забезпечують безперебійну роботу електроприводу під час провалів напруги, сформувані нові завдання необхідно до зниження напруги ланки постійного струму (ЛПС) до критичного рівня. Відомо, що час спрацьовування реле захисту мінімальної напруги становить від 20 до 40 мілісекунд після початку провалу напруги.

Як засіб подолання провалів напруги також розглядається включення до складу електротехнічного комплексу електроприводу активного випрямляча (АВ), зважаючи на здатність пристрою підтримувати напругу ланки постійного струму на рівні завдання. Однак, при несиметричних провалах напруги (у 80% випадків провали напруги несиметричні), для досягнення заданих вхідних струмів потрібно вносити коригування в систему управління перетворювачем, що враховує несиметрію напруги живлення.

У зв'язку з цим для забезпечення безперебійної роботи ЧРП при провалах напруги актуальною є завдання максимально швидкого визначення величини напруги живлення і передбачення динаміки зміни напруги ЛПС у разі некерованого випрямляча, або коригування системи управління з урахуванням отриманих про напругу живлення даних у разі активного випрямляча.

Мета роботи

Підвищення ефективності роботи електротехнічного комплексу частотно-регульованого електроприводу шляхом обґрунтованого вибору алгоритмів керування приводом у режимі провалу напруги.

Основні завдання дослідження

1. Аналіз практики та узагальнення передового досвіду щодо визначення параметрів напруги мережі при провалах напруги, порівняльна

оцінка відомих способів вирішення задачі швидкодії, необхідної кількості вихідних даних і точності визначених параметрів.

2. Розробка алгоритму визначення параметрів напруги ЛПС ЧРП з пасивним випрямлячем на основі найменшої кількості вимірювань напруги живлення.

3. Комп'ютерне моделювання роботи ЧРП з некерованим випрямлячем визначення динаміки зміни напруги ЛПС при провалах напруги різних типів і оцінки точності роботи запропонованого алгоритму.

4. Дослідження роботи електроприводу, що включає до свого складу АВ напруги визначення впливу з його роботу несиметричних провалів напруги різного типу.

5. Розробка системи управління АВ, що враховує параметри напруги мережі та порівняння впливу перетворювача на мережу при роботі з класичною системою управління та із запропонованою в умовах провалу напруги.

1 МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІІ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ І БОРОТЬБИ З НИМИ

Електропривод здатний підтримувати працездатність в умовах провалу напруги різними способами (наприклад, переходом в режим ослабленого поля), однак для цього системі управління необхідно заздалегідь отримати дані про динаміку зміни напруги у ланці постійного струму, що можливо, якщо відомі параметри провалу напруги.

1.1 Провали напруги в електричних мережах з точки зору показників та норм якості електричної енергії

У нормальному режимі роботи діючі значення напруг трифазної мережі знаходяться в межах 10% від номінальної напруги $U_{ном}$ мережі. Відповідно, максимальним значенням нормальної напруги є величина рівна $1,1 U_{ном}$, а мінімальним $0,9 U_{ном}$ напруги [3]. Інтенсивність провалу напруги визначається залишковою напругою мережі та її тривалістю.

$$\Delta U = \frac{U_{ном} - U_{ост}}{U_{ном}} 100\%. \quad (1.1)$$

При цьому якщо залишкова напруга становить менше 5% від опорного, вважають, що відбулося переривання напруги.

Тривалість провалу напруги t_n визначається проміжком часу з початку провалу напруги $t_{н.п.н.}$ до відновлення напруги в усіх фазах мережі до порогового значення $t_{к.п.н.}$. Тривалість провалів напруги не перевищує 1 хвилину.

Основними причинами виникнення провалів напруги в розподільчих мережах низької та середньої напруги є короткі замикання [5] та нерегульований пуск потужного навантаження [6]. Струм короткого замикання (КЗ) викликає додаткове падіння напруги лінії електропередачі, що призводить до зниження напруги в точці підключення навантаження. Пуск потужного навантаження, такий як асинхронні та синхронні електродвигуни,

також викликає струми, що перевищують номінальні в 5-7 разів, що також призводить до виникнення додаткового падіння напруги в лінії [4].

1.2 Частота виникнення провалів напруги в електричних мережах

Провали напруги – явище нерідке. Згідно зі статистикою, наведеною в [4], найбільшого поширення в кабельних мережах набули провали напруги глибиною до 30% і тривалістю до 100 мс (5 періодів напруги живлення), другим за поширеністю є провали напруги глибиною до 30% і тривалістю до 500 мс. Серед випадків, що залишилися, частіше за інших зустрічаються провали напруги глибиною близько 40% і тривалістю до 25 періодів напруги живлення.

Для змішаних мереж статистика аналогічна, проте частіше зустрічаються провали напруги глибиною до 40% і тривалістю до 5 періодів напруги живлення. Також у таких мережах широко поширені провали напруги глибиною до 100% (фактично переривання напруги), тривалістю до 1 секунди (50 періодів напруги живлення).

Наведена статистика підтверджується даними, що зібрані в інших країнах. Аналіз даних про провали напруги, зібраних в Австралії [5] протягом дев'яти років, показує, що 76% від загальної кількості провалів напруги триває менше 800 мілісекунд (до 40 періодів напруги живлення), при цьому 25% від загальної кількості провалів напруги становлять провали напруги тривалістю 5-6 періодів живлячої напруги напруги. Зазначено також, що у 70% випадків глибина провалів не перевищує 30%.

1.3 Класифікація провалів напруги

Динаміка провалу напруги описана в літературі багато разів і наведено багато прикладів змін напруги, зафіксованих під час провалів напруги в енергосистемах. Провал напруги можна розділити на три періоди, період зниження напруги від початкового (нормального) до залишкового $T_{н.н.1}$ період, протягом якого підтримується знижена напруга $T_{н.н.2}$ і період відновлення

напруги до нормального $T_{п.н.3}$. Період $T_{п.н.2}$ зазвичай значно більше двох інших, тому при класифікації провалів напруги описується саме він [9]. На рис. 1.1 схематично зображено етапи провалу напруги.

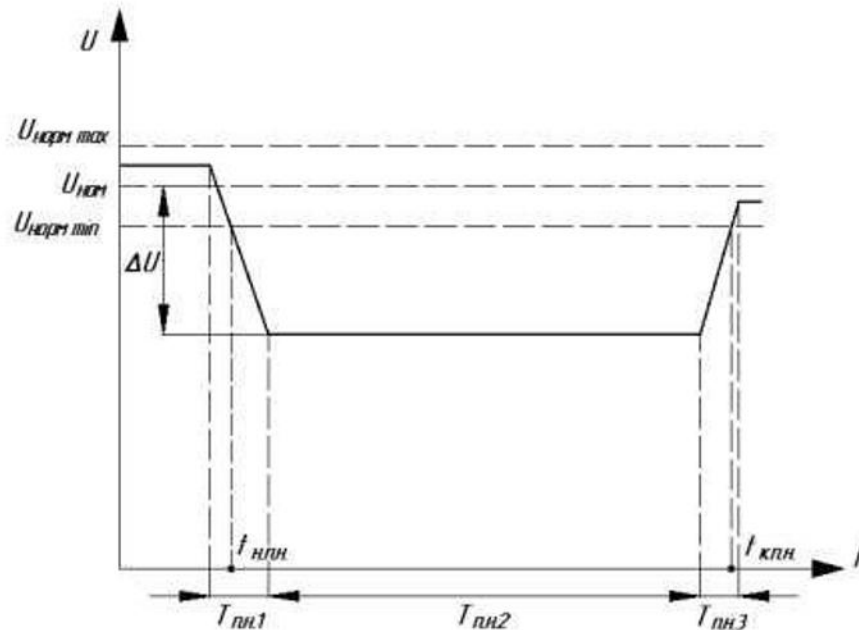


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни чинного значення напруги в одній із фаз трифазної мережі при провалі напруги

Провали напруги поділяють на симетричні та несиметричні. Симетричним називають провал напруги, протягом якого напруга всіх трьох фаз мережі знижується однаково. Причиною такого типу провалів напруги може бути трифазне КЗ або прямий запуск потужного двигуна. До несиметричних відносять інші типи провалів напруги, вони бувають викликані однофазними і двофазними короткими замиканнями. На тип провалу напруги, крім причин виникнення, впливає режим нейтралі, способи з'єднання обмоток трансформаторів в мережі, де відбулося коротке замикання, з'єднання обмоток в навантаженні.

Традиційно для опису несиметричних режимів роботи мережі застосовується метод симетричних складових [5] найбільш повно описує режим роботи мережі, на основі наявних даних про фазну напругу. Отримані

величини симетричних компонентів можна використовувати для розрахунку режиму роботи мережі.

Також для класифікація провалів напруги зручно застосовувати ABC метод [4, 6], заснований на групуванні різних провалів напруги по амплітуді напруг трифазної мережі та зсуву фаз між ними. Провал напруги відносять до однієї з семи груп, кожна з яких має певні властивості при поширенні електричної мережі, що значно спрощує аналіз аварійного режиму.

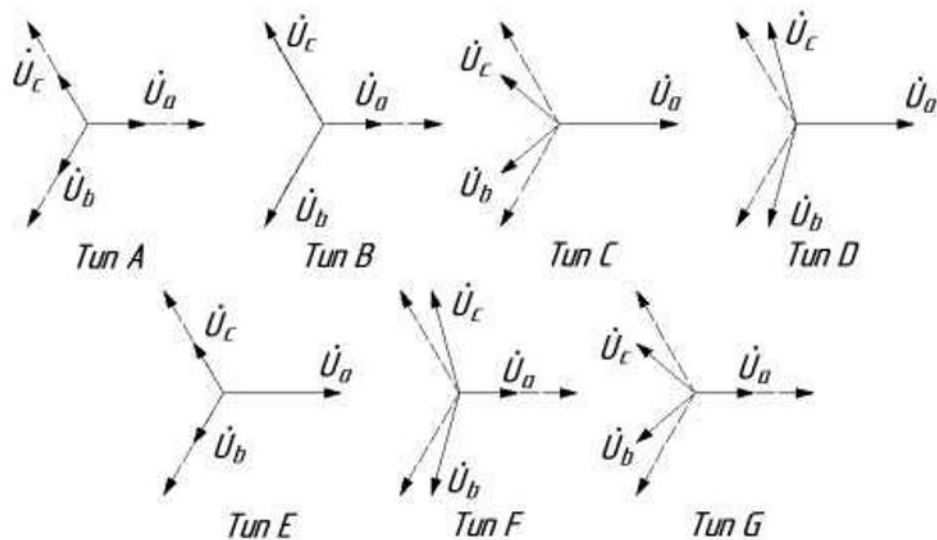


Рисунок 1.2 – Типи провалів напруги в ABC класифікації

Розглянемо деякі властивості та ознаки провалів напруги різного типу. Провал напруги типу А (рисунок 1.2) є симетричним провалом напруги при трифазному КЗ, характерний для мереж різних режимах роботи нейтралі. Тип В і Е описують однофазні та двофазні провали, причиною виникнення яких є короткі замикання на землю в мережі з глухо заземленою нейтраллю, що зустрічаються частіше інших [9]. Типи С та D трапляються в електричних мережах при двофазному короткому замиканні. Провали напруги типу F і G характерні для мереж із ізольованою нейтраллю, основною причиною їх виникнення є короткі міжфазні замикання [5].

У роботі під час опису провалів напруги буде використовуватися ABC класифікація, оскільки вона дуже інформативна.

1.4 Вплив провалів напруги на електропривод як елемент безперервного виробничого процесу

Короткочасні провали напруги, що характеризуються тривалістю 50-200 мс і глибиною 10-40% (найпоширеніші в промислових електричних мережах), можуть призводити до порушення технологічного процесу, простою виробництва та браку продукції внаслідок відключення частотно-регульованого приводу від мережі [8]. Відбувається це внаслідок зниження напруги у ланці постійного струму (ЛПС) приводу та спрацьовуванні реле захисту мінімальної напруги (ЗМН).

Однофазні провали напруги, що виникають у мережі напругою 380 кВ на заводі «ММК Metalurji», через трансформатор переходили у внутрішньозаводську мережу 34,5 кВ, що живить електропривод синхронних двигунів стану гарячого прокачування з частотним регулюванням, потужністю від 6,5 до 9,5 кВт. Несиметрія напруг на введенні частотних перетворювачів, що управляють електроприводом, призводить до зниження напруги постійного струму та відключення перетворювача від мережі через спрацювання захисту мінімальної напруги. Зупинка головних електроприводів технологічної установки із застряганням смуги в прокатних клітках ліквідується протягом 2 годин, протягом цього часу підприємство припиняє роботу, а заготовка, що зупинилася, попадає в брак. Проблема провалів напруги в цьому випадку була вирішена включенням в мережу підприємства активного статичного компенсатора, що демпфує провали напруги при їх виникненні.

На нафтопереробному підприємстві ТОВ «КІНЕФ» з 2011 по 2014 рік було зафіксовано в середньому 24 провали напруги на рік. У 80% випадків фіксувалися провали завглибшки 20-40% і тривалістю 100 мс [7]. В ході аварії спрацьовували реле захисту мінімальної напруги (реле ЗМН) у ланці постійного струму перетворювачів частоти асинхронних та синхронних електроприводів та відключали їх від мережі. Після відновлення напруги

система автоматичного повторного пуску відновлювала роботу технологічного кола. Однак було встановлено, що реле автоматичного повторного пуску не спрацьовувало при провалі напруги менше 100 мс (5 періодів напруги живлення), в той час як час спрацьовування реле ЗМН в середньому становило 20-40 мс (1-2 періоду напруги живлення). Таким чином, електродвигуни, зупинені під час провалу напруги, не запускалися повторно автоматично і вимагали ручного перезапуску.

Підприємства гірничодобувної галузі часто віддалені від централізованої енергосистеми, а виробничі об'єкти часто розосереджені, що робить їх енергосистеми вразливими до провалів напруги. Установки електровідцентрових насосів на родовищі живляться від лінії електропередачі 6 кВ, магістральна частина промислової мережі перевищує 10км, тривалість відгалужень доходить до 5 км. У роботах [5-6] показано, що провали напруги глибиною 20% і тривалістю близько 180 мс призводили до зупинки занурювальних насосів, що вело до збою технологічних процесів, помилкового спрацьовування систем мережевої автоматики і, як наслідок, підвищення втрат нафтовидобутку.

З описуваною проблемою стикаються також при підземному видобутку корисних копалин, наприклад, для провалів напруги вразливий електропривод шахтної підйомної установки [8]. Для підвищення стійкості електроприводу потужністю 315 кВт до провалів напруги автори пропонують використовувати батарею суперконденсаторів для короткострокової підтримки напруги ланки постійного струму на нормальному рівні протягом 100 мс.

З проблемою провалів напруги стикаються й у мережах тягового транспорту. Збільшення тягових навантажень призводить до підключення на паралельну роботу резервних випрямляльних агрегатів на тягових підстанціях, що супроводжується кидком струмів. Провали напруги, що виникають при цьому, призводять до помилкового спрацьовування комплексу технічних засобів модернізації та пристрою контролю сходу рухомого складу, а також відключення фідерів нетягових споживачів [2].

Зі схожою проблемою зіткнулися на газоперекачувальній станції в Норвегії [4]. Станція призначена для експорту газу, видобутого в північному морі споживачам у Бельгії, Франції, Німеччині, Великобританії та обладнана компресорами, що наводяться в рух шістьма синхронними двигунами потужністю 41,2 МВт з частотно-регульованим електроприводом. Несиметричні провали напруги, тривалістю від 50 до 150 мілісекунд (2,5 - 7,5 періодів напруги живлення), викликали аварійну зупинку компресорів що створювало небезпеку для трубопроводу внаслідок коливань швидкості потоку газу, що зумовлюють додатковий нагрівання труб. Аварійна зупинка компресорів вимагала ручного перезапуску, це своє чергу збільшувало простий станції. Описану проблему було вирішено шляхом внесення коригувань до алгоритму управління перетворювачем. Новий алгоритм управління знижував швидкість обертання двигуна при різкому зменшенні моменту сили, що вимірюється з його валу, що є характерною ознакою провалу напруги.

Крім безпосередньо зниження напруги ЛПС, електропривод може відключитися від мережі внаслідок зниження напруженості магнітного поля, що утримує контактор у включеному положенні [9]. Викликано це тим, що сила, що утримує контактор у включеному положенні, пропорційна квадрату напруги, що живить електромагніт.

Існує метод оцінки економічної шкоди від провалів напруги та розрахунки, отримані в результаті спостережень за роботою енергосистеми Нідерландів [10], підтверджують припущення про те, що збитки від провалів напруги прямо пропорційні кількості споживачів, які зупинили роботу у разі зниження напруги. Тому підвищення стійкості кожної окремої електроустановки веде до зниження збитків від провалів напруги.

Наведені приклади показують, що з проблемою стійкості при провалах напруги стикаються електроприводи в широкому діапазоні потужності від десятків і сотень кіловат до десятків мегават. Небезпека для нормальної

роботи частотно-регульованого електроприводу є провалом напруги тривалістю від 50 мс і глибиною від 20%.

1.5 Методи боротьби з провалами напруги у мережах промислових підприємств

Наведені у попередньому розділі приклади ілюструють актуальність проблеми виникнення провалів напруги у розподільчих мережах підприємств. Описана проблема не є новою та для зниження впливу провалів напруги на роботу критично важливих виробничих установок розроблено різні стратегії. Існує два різних класи розв'язання цього завдання. Перший клас включає рішення пов'язані з оптимізацією електричної мережі для мінімізації області розповсюдження, глибини та частоти виникнення провалів напруги. Друга група рішень спрямована безпосередньо на подолання провалу напруги засобами електроприводу. У розділі розглянемо першу групу способів.

Кардинально вплив коротких замикань на формування провалів напруги в точці підключення навантаження зменшує спосіб поділу внутрішньозаводської мережі підприємства високої напруги на незалежні контури, зв'язок між якими зберігається через зовнішню мережу електропостачання високої напруги [13] апаратів на підстанціях та в щитових, що веде до збільшення витрат на електроустаткування.

В якості боротьби з провалами напруги пропонується використовувати існуючу на підприємстві систему релейного захисту і автоматики, наприклад здійснювати автоматичне включення резерву (АВР) при провалі напруги [9].

Для підтримки напруги в точці приєднання навантаження може бути використаний вольтододатковий трансформатор (ВДТ). Первинна обмотка ВДТ включається до лінії електропередачі паралельно, а вторинна послідовно, так, що напруга на вторинній обмотці додається до напруги в точці підключення трансформатора. У нормальному режимі роботи трансформатор компенсує падіння напруги лінії електропередачі. При провалі додаткова напруга забезпечує нормальний режим роботи обладнання, підключеного до

мережі. Відомі керовані ВДТ здатні перемикати число витків у первинній обмотці, тим самим регулюють коефіцієнт трансформації та некеровані ВДТ з постійним коефіцієнтом трансформації. Для боротьби з провалами напруги застосовуються обидва види [5].

Постійне живлення відповідальних споживачів від власних генеруючих станцій малої потужності також розглядається як захист електроустановок від провалів та переривань напруги [20], переваги та недоліки такого рішення очевидні. Утворена у такий спосіб локальна енергосистема повністю ізольована від впливів зовнішньої мережі і це повністю знімає проблему провалів напруги. Це рішення, проте, вимагає серйозного обґрунтування, оскільки потребує встановлення біля підприємства комплексу устаткування, потребує кваліфікованого обслуговування [4].

Джерела безперебійного живлення (ДБЖ), такі як акумуляторні батареї (АБ) та резервні дизель-генераторні пристрої (ДГП являють собою з'єднання синхронного генератора та дизельного двигуна), також розглядаються як засоби боротьби з тривалими (більше 1с) провалами напруги. Установка пристроїв дозволяє при зниженні напруги до граничного значення перейти на резервне живлення з наступним підключенням до мережі при відновленні напруги. При перериваннях напруги підтримують електропостачання споживачів протягом кількох годин, доки не витратять паливо чи заряд. Акумуляторні батареї як правило застосовуються для резервного живлення менш потужного навантаження (наприклад центрів обробки даних) або для встановлення в тих місцях, де робота дизельного двигуна небезпечна. ДДУ забезпечують електропостачання споживачів потужних споживачів чи груп споживачів [8]. Недоліком використання ДБЖ є необхідність постійної підтримки їх у режимі готовності до запуску, на що витрачається електроенергія (наприклад, на підтримку температурного режиму електроустановки). Неможливе також миттєве перемикання на резервне харчування.

Існує також ряд накопичувачів електроенергії, здатних швидко звільнити запасену енергію, для підтримки напруги на нормальному рівні при провалах напруги, до них відносять: суперконденсатори, що запасують енергію в електричному полі; надпровідні котушки індуктивності, що запасують енергію в магнітному полі; маховики, що запасують механічну енергію обертання [8]. Перераховані типи накопичувачів підключаються до збірних шин розподільчої мережі та вивільняють запасену в них енергію при провалах напруги.

У разі переривання напруги або тривалого (порядку 1 секунди) провалу напруги, при перемиканні на живлення від ДБЖ (часто суперконденсатори та надпровідні індуктивності розглядаються в тандемі з АБ [12]), такі накопичувачі в комплекті з перетворювачами можуть підтримувати електропостачання споживачів під час перемикань.

Слід також зазначити іншу функцію таких установок. Надпровідні котушки індуктивності та суперконденсатори, що підключаються до мережі змінного струму через силові перетворювачі (устрою силової електроніки) та трансформатори, утворюють динамічні компенсатори спотворень напруги (ДКСН). При реєстрації провалу напруги ДКСН формує струми первинної обмотки трансформатора таким чином, щоб напруга на вторинній обмотці повністю компенсувала його .

Пристрої ДКСН працюють за описуваним принципом можуть зовсім не містити накопичувача електроенергії, а використовувати енергію мережі для добавки напруги в точку загального підключення, в цьому випадку вони працюють за принципом ВДТ з коефіцієнтом регульованим трансформації, а можливість компенсації визначається залишковим напругою мережі.

Як пристрій ДКСН може виступати статичний компенсатор реактивної потужності, за наявності такого в точці загального підключення навантаження. При зниженні напруги він за наявності запасу струму інвертора може підтримати напругу на навантаженні, перейшовши в режим перекомпенсації реактивної потужності. Динаміка пристрою на основі статичного

компенсатора вкрай велика, що дозволяє компенсувати провал напруги за час близько 5 мс, однак такий режим роботи вимагає особливого управління пристроєм та наявності запасу по струму перетворювача [8-9].

Маховики, що є синхронним електродвигуном з інерційною масою, закріпленою на валу, не вимагають додаткових перетворювачів і підключаються до мережі безпосередньо, працюючи при провалі напруги в режимі рекуперації. Часто застосовується зв'язка – маховик-ДГУ, у якій маховик згладжує провали напруги тривалість щонайменше 10 мс [10]. При реєстрації провалу напруги відповідальна група споживачів відключається від мережі і підключається до синхронного генератора на валу якого розкручений маховик, одночасно подається сигнал на пуск двигуна. Якщо протягом секунди живлення не відновлюється, синхронний генератор підключається до дизельного двигуна. Недоліком маховиків є великі втрати, оскільки 99,9% робочого часу, установка споживає електроенергію на компенсацію тертя і підтримку швидкості обертання інертної маси.

Аналіз відомих способів боротьби з провалами напруги в мережах промислових підприємств показав, що існує велика кількість способів зниження впливу провалів напруги на роботу електрообладнання електричної мережі. Розглянуті способи відрізняються від вибору топології мережі, такого, щоб мінімізувати вплив провалів напруги на чутливих до них споживачів електроенергії, до встановлення спеціальних пристроїв, що підтримують напругу в точці підключення навантаження на заданому рівні. Загальною для розглянутих методів є необхідність витрат на встановлення додаткового обладнання, що може бути вагомою причиною відмовитися від їх використання.

1.6 Методи подолання провалів напруги засобами електроприводу

У цьому розділі розглянемо групу методів подолання провалів напруги власними засобами електроприводу. На відміну від способів, розглянутих у попередньому розділі, методи, що розглядаються тут, спрямовані на

подолання провалу напруги приводом електроустановки, перерви в роботі якої небезпечні для людей або можуть спричинити значні економічні збитки, за допомогою системи автоматичного управління або пристроїв релейного захисту та автоматики.

Найбільше розповсюдження при провалах напруги отримала наступна стратегія управління електроприводом. до його зупинки. Слід звернути увагу на те, що робота автоматики може призвести до серії короточасних провалів напруги, обумовлених пусковими струмами двигунів [9], при цьому число послідовних провалів буде дорівнює кількості спрацьовувань реле.

Як вирішення проблеми забезпечення працездатності електроприводу під час провалів напруги пропонується вводити до складу приводу активний випрямляч (АВ), що підтримує напругу ЛПС на рівні завдання. Зокрема, розглядається застосування активного випрямляча напруги, для нормальної роботи якого необхідно підтримувати напругу ЛПС вище амплітуди лінійної напруги [3]. Крім цього, активні випрямлячі підтримують вхідні струми синусоїдальними, що значно знижує вплив електроприводу на якість електроенергії.

Для підтримки сталості напруги в ЛПС під час провалу напруги може бути використаний пристрій сімейства підвищують перетворювачів (boost converters) [5-7]. Перетворювач включається у розрив між випрямлячем та інвертором. Система автоматичного управління при достатній потужності джерела підтримує вихідну напругу перетворювача на рівні завдання та нівелює вплив на нього коливань вхідної напруги. Застосування може бути ефективним у разі, якщо збільшене споживання струму не призведе до збільшення падіння напруги в мережі і зниження напруги на вході випрямляча. Постійна робота перетворювачів такого типу знижує коефіцієнт корисної дії ланки постійного струму через додаткові втрати в дроселях і ключах, що входять до складу перетворювача. У зв'язку з цим пропонується використовувати перетворювач лише під час провалів напруги [10]. До цього ж класу способів подолання провалів напруги силами електроприводу можна

віднести використання інверторів з особливою будовою ланки постійного струму (наприклад, Z-інвертор) [7].

Крім доповнення ланки постійного струму, перетворювачами пропонується використовувати додаткові накопичувачі електроенергії [12], що встановлюються паралельно конденсатору ЛПС. Як накопичувачі розглядаються АБ, суперконденсатори і надпровідні котушки індуктивності, і підтримують роботу електроприводу під час провалів і переривань напруги.

У роботі [7] розглянуто роботу частотно-регульованого асинхронного електроприводу як ослабленого поля. Встановлено, що при зниженні напруги у ланці постійного струму звужується область регулювання електроприводу, обмежена максимально допустимим струмом інвертора та еліпсом, що визначає межі регулювання струму статора за величиною напруги ЛПС. Оскільки велика піввісь еліпса, зорієнтована у бік осі q -компоненти струму статора, а крива постійного моменту є гіперболу, то при зниженні напруги ланки постійного струму момент на навантаженні може підтримуватися на номінальному рівні при зменшенні величини d -складової струму статора. Відповідно, і послаблюючи потокозчеплення ротора і збільшуючи величину q -складової струму статора можна підтримувати необхідний електромагнітний момент при зниженні напруги ЛПС. Такий режим називається режимом ослабленого поля.

У випадках, коли зниження напруги ЛПС унеможливило підтримку режиму роботи приводного механізму, слід, якщо це можливо за умовами роботи установки, знизити потужність на валу двигуна, а, отже, і потужність, що споживається електроприводом. Реалізується це шляхом зниження заданої швидкості обертання. У тому випадку, якщо рух наводиться насос, компресор, вентилятор або інший механізм, момент опору якого пропорційний квадрату частоти обертання, навіть незначне зниження швидкості веде до значного зменшення потужності на валу двигуна. При цьому відтік енергії з ланки постійного струму знижується і його напруга стабілізується, що дозволяє успішно встановити подолати провал напруги [4].

Якщо зниження напруги ЛПС не дозволяє перейти в режим ослабленого поля, а умови роботи приводного механізму не дозволяють знизити потужність приводу, що споживається, підтримка працездатності приводного механізму неможлива. Однак у цьому випадку можна знизити час запуску електроприводу при відновленні живлення, а також зменшити пускові струми. Для цього рекомендується підтримувати вибігання двигуна зі збереженням його керованості [9]. В обмотках статора при цьому повинен формуватися мінімальний струм, а втрати енергії, по можливості забезпечуватися рекуперація кінетичної енергії, запасеної частинами механізму, що обертаються. Ці заходи забезпечать мінімізацію споживання електроенергії та збережуть заряд у ЛПС для повторного запуску.

З усіх описаних способів подолання провалів напруги найбільший інтерес викликають ті, що не вимагають встановлення додаткового обладнання на рівні електричної мережі ні на рівні окремого електроприводу. У групу способів, дозволяють повністю або частково зберегти працездатність приводного механізму в умовах провалу напруги власними силами електроприводу, входять зниження потужності приводної установки, перехід в режим рекуперації, переведення двигуна в режим ослабленого поля. Однак, для того, щоб перевести електропривод у будь-який з перерахованих режимів роботи необхідно знати динаміку зміни напруги ланки постійного струму при провалі напруги, що вимагає даних про тип і глибину напруги.

Також актуальним є вирішення проблеми підтримання напруги ЛПС за допомогою активного випрямляча. Система управління АВ, проте, вимагає внесення коригувань у несиметричних режимах, яких відноситься 80% провалів напруги [8]. Коригування завдання АВН проводиться з урахуванням відомих даних про напругу мережі, тому розглянемо далі відомі способи визначення параметрів провалів напруги.

1.7 Методи реєстрації провалів напруги

Як було показано в попередньому розділі, електропривід здатний долати короткочасні провали напруги власними силами, проте для цього необхідно своєчасно (до зниження напруги ЛПС нижче за уставку РПН, що зазвичай становить від 1 до 2 періодів напруги живлення [7]) визначити його початок і глибину. Тому питання вибору способу визначення початку провалу напруги, а також його параметрів є важливим.

Звичайним рішенням цього завдання є реєстрація провалів напруги зниження діючого значення напруги в одній з фаз. Чинне значення або середньоквадратичне значення напруги за період визначається формулою:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}, \quad (1.2)$$

де $u(t)$ – функція, що описує зміну миттєвого значення напруги.

При аналізі реальних даних, отриманих від цифрових вимірювачів, переходять від інтеграла до суми [9]. При цьому усереднення виконують на масиві даних, що відповідає тривалості періоду напруги. МЕК у стандарті №61000-4-30 рекомендує оновлювати певне на повному періоді діюче значення напруги за даними про половину періоду напруги, тому для визначення провалу напруги описуваним способом потрібно від 10 мс.

Для прогнозу та визначення глибини провалів напруги пропонувався метод, заснований на аналізі топології розподільної мережі та визначення глибини провалу напруги за даними про протяжність лінії електропередачі і розрахованих струмах короткого замикання. Будь-який розподільчої мережі при цьому відповідає таблиця в якій позначено знижується або немає напруги в деякій точці мережі при виникненні напругою в цьому випадку називається таке діюче значення напруги, при збереженні якого в деякій точці мережі електроустаткування, приєднане до цієї точки, зберігає працездатність. Методу є необхідність оновлення табличних даних при зміні конфігурації мережі, наприклад, у випадку автоматичного введення резерву, розрахунки

можуть містити помилку якщо параметри ліній електропередачі визначені не точно.

Перетворення Фур'є використовується для представлення функції часу функцією частоти, на чому заснований частотний аналіз. Цифровими, так і аналоговими [5], проте у нього є деякі недоліки.

Для подолання цього обмеження використовується удосконалений метод, що базується на класичному перетворенні і називається перетворення Фур'є для коротких відрізків часу (short time Fourier transformation). Для виконання цього перетворення аналізований масив даних розбивається на окремі фрагменти. Сигнал вважається таким, що встановився протягом кожного з отриманих відрізків часу, це дозволяє застосувати до кожного з них швидке перетворення Фур'є. Для досягнення гарної роздільної здатності спектр сигналу аналізується з використанням різних віконних функцій [6].

Для ідентифікації провалів напруги застосовується також фільтр Кальмана [4]. Дискретний алгоритм використовує математичну модель сигналу, що базується на припущенні про те, що фазна напруга в кожний момент часу визначається як лінійна комбінація вектора гармонійних складових та вектора помилки вимірювання напруги.

$$z_k[n] = H_k[n]U_k[n] + err_k[n] = \begin{bmatrix} \sin(\omega n \Delta t) \\ \cos(\omega n \Delta t) \\ \dots \\ \sin(m\omega n \Delta t) \\ \cos(m\omega n \Delta t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U_{11} \\ U_{21} \\ \dots \\ U_{1m} \\ U_{2m} \end{bmatrix} + err_k[n], \quad (1.3)$$

де z_k – матриця Кальмана, H_k – матриця гармонійних складових,

U_k – матриця амплітуд гармонік, err_k – матриця помилки,

n – номер ітерації, m – порядок гармоніки.

Суть роботи алгоритму полягає в тому, щоб ітераційним шляхом змінювати амплітуди гармонійних складових, доки вектор помилки не набуде нульових значень.

Варто зазначити, що для обчислення параметрів напруги при використанні фільтра Кальмана потрібна невелика кількість початкових даних, що робить його ефективним для визначення провалів напруги. Показано, що швидкість визначення чинного значення напруги пропонуваним методом становить менше 5 мс [5].

Для дуже швидкого (до 2 мс) визначення наявності та глибини провалу напруги в кожній із фаз застосовується метод, заснований на поділі сигналу на окремі частотні діапазони (низькочастотні складові та високочастотні складові). Досягається це згортою за деякою базисною функцією або материнською вейвлет (Wavelet) функції $\psi(t)$ [6, 7]. Нехай є деяка функція часу $x(t)$ тоді вейвлет-перетворення $WT(a, \tau)$ цієї функції визначається виразом:

$$WT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{\epsilon} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1.4)$$

де a - параметр зсуву, або крок зсуву не дорівнює нулю, b - постійна, вибирається так, щоб a та b представляли ортонормований базис.

Встановлено також, що корінь квадратний з енергії спектра сигналу в частотному вікні на якому відбувається вейвлет-перетворення ϵ_{ϵ} нормований по деякій енергії $E_{\text{норм}}$ відповідної деякому діючому значення напруги $U_{\text{норм}}$ має практично стовідсоткову кореляцію з діючим значенням напруги U нормованим по тій же величині $U_{\text{норм}}$:

$$\frac{U}{U_{\text{норм}}} \approx \sqrt{\frac{\epsilon_{\epsilon}}{E_{\text{норм}}}}, \quad (1.5)$$

що дозволяє визначити діюче значення напруги за відомої щільності енергії спектра, отриманого при перетворенні вейвлет [5].

До недоліків розглянутого способу можна віднести те, що обчислення повинне проводитися для кожної фази окремо, що знижує швидкість обчислень, або веде до збільшення обчислювальних потужностей.

Відомі чисельні методи визначення типу провалу напруги, а також параметрів прямої та зворотної послідовності напруги трифазної мережі на

основі аналізу годографа узагальненого вектора напруги мережі [3, 5, 8]. Методи дозволяють за трьома і більше значеннями напруг трьох фаз, визначити параметри годографа узагальненого вектора, які безпосередньо пов'язані з величинами прямої та зворотної послідовності напруги мережі. У тому числі, слід виділити метод визначення параметрів годографа узагальненого вектора напруги, оскільки швидкодією він поступається вейвлет алгоритмам, і виконує обчислення трьох напруг мережі одночасно. Недолік методу полягає в його нездатності визначати компоненту нульової послідовності, тому метод здатний визначити тільки лінійні напруги.

Аналіз існуючих методів ідентифікації провалів напруги показав, що запропоновані в літературі методи дозволяють точно визначати зниження напруги за мілісекунди, що дозволяє застосовувати їх для реєстрації провалу напруги та визначення його глибини до розряду накопичувача у ланці постійного струму, щоб вибрати стратегію управління електроприводом, що дозволяє подолати провал напруги із збереженням режиму приводного приводу.

При виборі способу визначення провалів напруги враховувалися точність визначення його параметрів і швидкодія способу, найбільш важливі параметри в контексті задачі. З розглянутих у розділі способів, ці якості поєднують у собі поєднують в собі вейвлет аналіз та спосіб визначення компонентів прямої та зворотної послідовностей напруги за параметрами годографа узагальненого вектора напруги мережі.

Висновки за розділом 1

1. Проблема провалів напруги залишається актуальною, незважаючи на велику кількість робіт, присвячених її вирішенню. З наведених прикладів впливу цього явища на технологічне обладнання і наведеної статистики зрозуміло, що провали напруги можуть викликати аварійну зупинку частотно-регульованого електроприводу потужністю від десятків і сотень кіловат до десятків мегават, якщо їх тривалість перевищує 50 мілісекунд, а глибина

перевищує 0%. Згідно з представленою в розділі статистикою під ці умови потрапляє 80% провалів напруги, що трапляються в діючих енергосистемах.

2. Аналіз засобів і способів боротьби з провалами напруги показав, що існує ряд способів подолання провалів напруги власними засобами електроприводу зі збереженням режиму роботи приводного механізму (використання активного випрямляча в складі електроприводу, робота приводу в режимі ослабленого поля), з підтримкою роботи електроприводу і зниженим споживанням потужності і переведення двигуна в режим.

3. Способи подолання провалів напруги власними засобами електроприводу є доцільними, оскільки не вимагають застосування додаткового обладнання ні в системі електропостачання, ні в системі електроприводу (виключенням є заміна в структурі пасивного пасивного випрямляча активним).

4. Застосування описаних способів вимагає максимально швидкої реєстрації провалу напруги та визначення його параметрів. Аналіз відомих способів реєстрації провалів напруги показав, що спосіб, заснований на визначенні параметрів годографа узагальненого вектора напруги мережі, найбільш зручний для визначення величин напруги живлення при їх миттєвому зміні.

2 НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ

2.1 Узагальнені вектори трифазної мережі

Для подальшого аналізу роботи трифазної мережі в умовах провалу напруги перейдемо до представлення електричних величин у вигляді узагальнених векторів у різних системах координат (СК). Такий перехід часто застосовується в системах управління електроприводом [5-8], пристроями компенсації реактивної потужності [9-14] і вищих гармонік [15] з синхронізацією [16].

Базовим у такому підході до опису роботи електротехнічних систем та комплексів є уявлення миттєвих значень електричних величин у вигляді узагальнених векторів [7]. У випадку трипровідних пристроїв (до яких відноситься асинхронний електропривод) адекватні графічні інтерпретації узагальнених векторів можна зобразити в площині декартової, стаціонарної СК, що позначається abc , три осі якої розташовані під кутом 120° один до одного. По осях цієї СК відкладаються миттєві значення електричних величин. Так як СК abc є плоскою, то для спрощення операцій з векторами можна зробити перехід до двомірної СК, що позначається $\alpha\beta$ за допомогою перетворення Кларка [3] (рівняння 2.1).

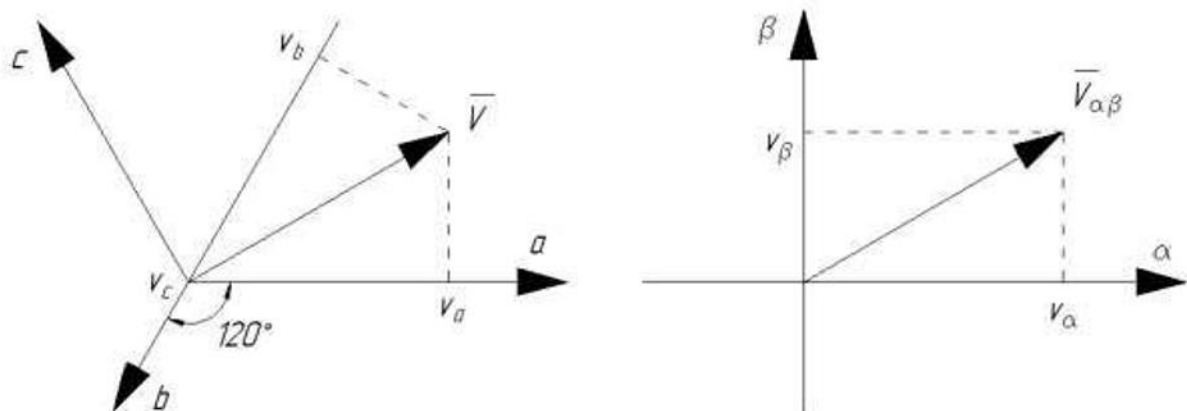


Рисунок 2.1 – Трифазна та двофазна системи координат узагальненого вектора трипровідної мережі

На рис. 2.1 у тривимірній та двовимірній системах координат зображено деякий узагальнений вектор V . Координати вектора в СК abc позначені v_a , v_b і v_c відповідно, координати вектора СК $\alpha\beta$ позначені v_α і v_β відповідно.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Крім перетворення, представленого вище, часто застосовується перехід до поверненої на деякий кут, щодо осі α або весь час обертається декартової системі координат. Перетворення це відоме у вітчизняній літературі під назвою перетворення Горьова, а в іноземній літературі – перетворення Парку [7]. Координат вектора в СК, що обертається, позначимо, як це прийнято в технічній літературі, v_d і v_q .

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Кут θ у рівнянні 2.2 може залишатися незмінним або змінюватися у відповідність до деякої функції часу, на формі перетворення це не відображається. З формули прямого перетворення нескладно перейти до зворотного перетворення, повертаючи систему координат, до якої наводиться аналізований вектор у зворотному напрямку на кут $-\theta$, що призведе до зміни знаків непарних функцій у формулі 2.2.

Усі перелічені перетворення будуть у подальшому використані на вирішення завдань дослідження. У контексті провалів напруги особливий інтерес становлять властивості узагальнених векторів у несиметричних режимах.

2.2 Властивості узагальнених векторів трифазної мережі в симетричному та несиметричному режимах

У симетричних режимах роботи трифазної мережі амплітуди фазної і лінійної напруги рівні, а різниця фаз основних гармонійних складових

відповідних напруг дорівнює 120° . Несиметричним називається будь-який режим, що не відповідає цим вимогам. Оскільки предметом дослідження є несиметрична напруга живлення, перейдемо від узагальненого вектора деякої електричної величини V до узагальненому вектору напруги U і надалі розглядатимемо його властивості.

Відомо, що в симетричному режимі годограф узагальненого вектора напруги є коло [3], інтерес представляє опис траєкторії руху вектора в несиметричних режимах. Він кількісно визначає несиметрію напруги трифазної системи за двома параметрами: коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{U2} і коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю K_{U0} [11]. Ці коефіцієнти визначаються виходячи з методу симетричних складових [5].

У синусоїдальному режимі метод симетричних складових просто застосувати до узагальненого вектора трифазної мережі. Слід зазначити, що в несинусоїдальному режимі пряме перетворення неможливе [7, 8]. Якщо спотворення відсутні узагальнений вектор має дві складові в площині координат $\alpha\beta$, що описують пряму і зворотну послідовність відповідно. Для представлення нульової послідовності в простір узагальненого вектора додається третій вимір 0, по цій осі відкладається тільки нульова складова узагальненого вектора [3]. Компоненти нульової послідовності при перетворенні компенсують один одного в площині координат α , нульова складова узагальненого вектора в ній представлена бути не може, цим пояснюється необхідність введення додаткового вимірювання. Розглянемо узагальнений вектор несиметричної синусоїдальної напруги трифазної мережі з координатами u_a , u_b та u_c . Компоненти прямої, зворотної та нульової послідовності напруги позначені A_1 , A_2 та A_0 відповідно.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(\omega t) + A_0 \sin(\omega t) \\ A_1 \sin(\omega t - 2\pi/3) + A_2 \sin(\omega t + 2\pi/3) + A_0 \sin(\omega t) \\ A_1 \sin(\omega t + 2\pi/3) + A_2 \sin(\omega t - 2\pi/3) + A_0 \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

При приведенні компонентів прямої та зворотної послідовності до стаціонарної системи координат окремо (рівняння 2.3) утворюються два вектори, з амплітудами рівними A_1 і A_2 один з яких обертається за годинниковою стрілкою, а інший проти годинникової стрілки з частотою ωt . Отриманий результаті складання цих компонент узагальнений вектор кінцем своїм описує еліпс [4]. Компоненти нульової послідовності не враховуються, оскільки електропривод є трипровідним навантаженням і тому не може бути ні джерелом, ні споживачем струмів нульової послідовності. Траєкторія узагальненого вектора напруги у несиметричному режимі на площині СК $\alpha\beta$ представлена на рис. 2.2.

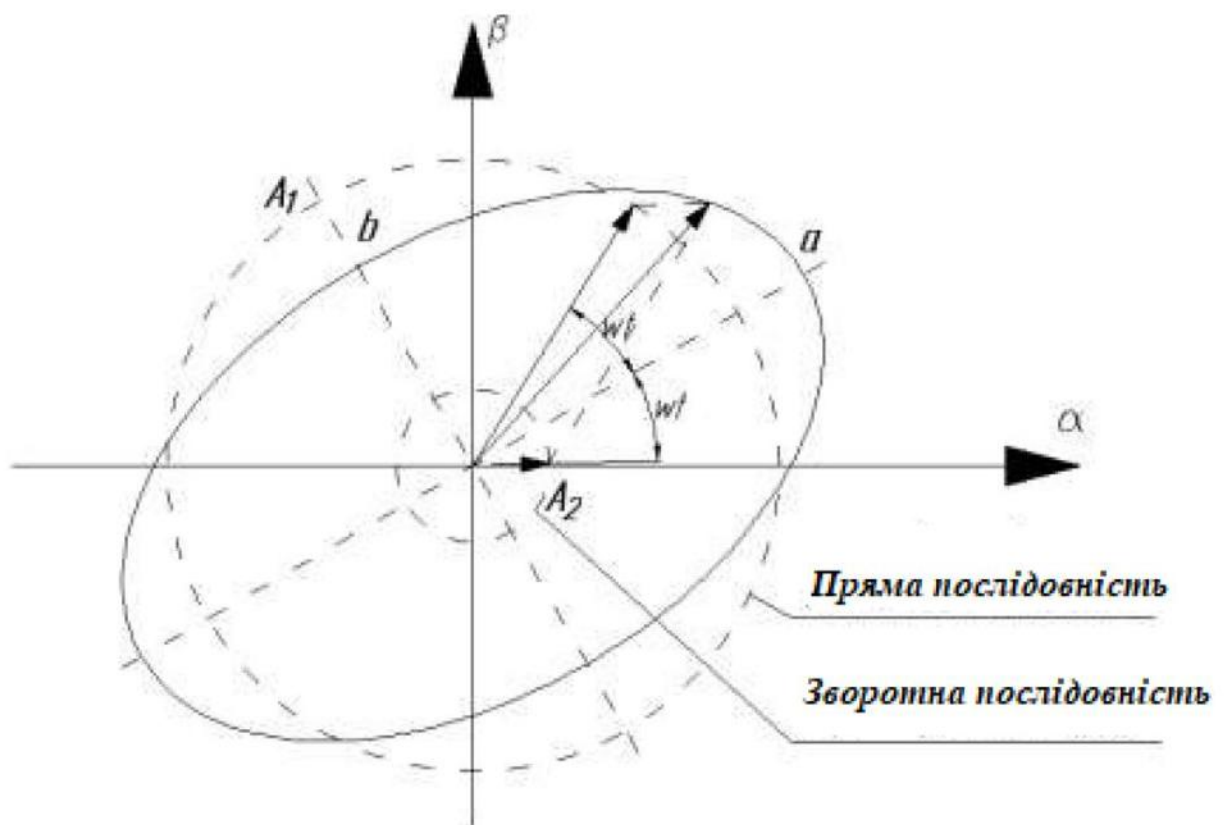


Рисунок 2.2 – Компоненти прямої та зворотної послідовності годографа узагальненого вектора трифазної мережі

На рис. 2.2 літерами a та b позначені велика та мала півосі еліпса відповідно. Величини півосей еліпса пов'язані з величинами компонентів зворотної та нульової послідовності рівнянням 2.4:

$$\begin{cases} a = A_1 + A_2; \\ b = A_1 - A_2. \end{cases} \quad (2.4)$$

При розгляді типів провалів напруги у попередньому розділі було встановлено, що провали напруги є в основному несиметричними. Симетричний режим роботи мережі можна розглядати як окремий випадок несиметричного (так само як коло, є окремим випадком еліпса) тому надалі вважатимемо, що годограф узагальненого вектора трифазної мережі в загальному випадку являє собою еліпс.

2.3 Канонічні системи координат та їх властивості

У розділі розглядаються властивості еліпса як геометричної фігури, а також застосування їх при визначенні режиму мережі. Для будь-якого еліпса можна знайти декартову систему координат $\alpha'\beta'$ (названу канонічною), в якій еліпс описуватиметься рівнянням (названим канонічним):

$$\left(\frac{\alpha'}{a}\right)^2 + \left(\frac{\beta'}{b}\right)^2 = 1 \quad (2.5)$$

Найважливіша властивість канонічних систем координат, можна сформулювати наступним чином: в синусоїдальному режимі, проекції вектора напруги на осі СК, яка зорієнтована по великій і малій півосях еліпса, рухаються за законом синуса та косинуса:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha'} \\ u_{\beta'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos(\omega t + \psi) \\ b \sin(\omega t + \psi) \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Показати справедливості цього твердження можна, використовуючи висновки, отримані у попередньому розділі (рис. 2.2). Проекції компонентів прямої та зворотної послідовностей на осі канонічної системи координат $\alpha'\beta'$ (далі КСК) описуються рівнянням 2.7:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha'} \\ u_{\beta'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(-\omega t) \\ A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(-\omega t) \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Тоді, з рівнянь 2.4 та 2.7 виводиться рівняння 2.6. Видно, що КСК завжди орієнтована так, щоб вектори компонент прямої та зворотної послідовності перетинали її осі одночасно. Надалі будемо вважати віссю α' ту вісь, на яку проектується складова узагальненого вектора, що описується функцією $\cos(\omega t)$, а віссю β' ту вісь, на яку проектується складова узагальненого вектора, що описується функцією $\sin(\omega t)$.

Знаючи координати будь-яких двох положень узагальненого вектора в КСК, можна визначити довжини півосей його годографа:

$$\begin{cases} a = \frac{\sqrt{|u_{\alpha'}^2(t_2)u_{\beta'}^2(t_1) - u_{\alpha'}^2(t_1)u_{\beta'}^2(t_2)|}}{\sqrt{|u_{\beta'}^2(t_1) - u_{\beta'}^2(t_2)|}}, \\ b = \frac{\sqrt{|u_{\alpha'}^2(t_1)u_{\beta'}^2(t_2) - u_{\alpha'}^2(t_2)u_{\beta'}^2(t_1)|}}{\sqrt{|u_{\alpha'}^2(t_1) - u_{\alpha'}^2(t_2)|}} \end{cases}, \quad (2.8)$$

де $u_{\alpha\beta}(t_1)$, $u_{\alpha\beta}(t_2)$ – пари координат векторів зафіксовані в різні моменти часу t_1 і t_2 .

Таким чином, у разі коли відомо положення канонічної системи координат щодо стаціонарної системи координат $\alpha\beta$ можна для однозначного визначення траєкторії обертання вектора напруги достатньо знати координати двох точок розташованих в одному квадранті КСК (умова введена для виключення точок екстремуму в області визначення функцій, заданих рівнянням 2.8).

2.4 Властивість сталості площ секторів, пройдених узагальненим вектором за рівні проміжки часу, в встановлених режимах

Описані в попередніх розділах властивості годографа узагальненого вектора справедливі тільки в тому випадку, якщо трифазна система працює в режимі, що встановився.

Кінець узагальненого вектора, проєкції якого на осі КСК змінюються відповідно до законів синуса і косинуса, за однаковий час проходить відстань така, що площа секторів, утворених двома сусідніми точками, що позначають

його положення в різні моменти часу, і центром траєкторії залишається незмінною.

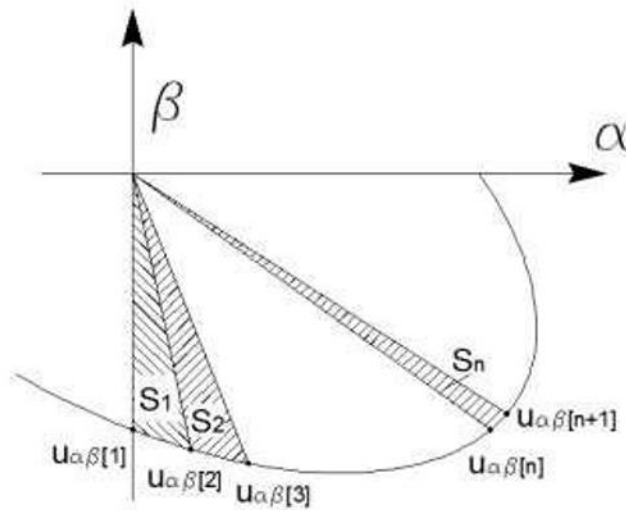


Рисунок 2.3 – Координати узагальненого вектора напруги, визначені через рівні проміжки часу

На еліпсі, розташованому в СК $\alpha\beta$, відмічено ряд точок. Точки відкладені через рівні проміжки часу, розташовані отже площі секторів між сусідніми точками однакові, тобто. якщо вектор напруги виявляється в точках $u_{\alpha\beta}[1]$, $u_{\alpha\beta}[2]$, $u_{\alpha\beta}[3]$ через рівні проміжки часу, то S_1 і S_2 повинні бути рівні. Доведемо це твердження для малого (у межі нескінченно малого) проміжку часу. Площа сектора для малого проміжку часу дорівнює

$$\Delta s = \frac{a \cos(\omega t_0) b \sin(\omega t_0 + \omega \Delta t) - a \cos(\omega t_0 + \omega \Delta t) b \sin(\omega t_0)}{2} = \frac{1}{2} ab \sin(\omega \Delta t), \quad (2.9)$$

де Δs – площа сектора, t_0 – деякий час, с; рад/с; ωt_0 – кут, що визначає положення вектора напруг щодо осей канонічної СК, Δt – проміжок часу між вимірюваннями.

Таким чином, площа секторів відміряних за рівні інтервали часу в режимі, що встановилася, однакова і не залежить від часу вимірювання, для її обчислення потрібно тільки два вимірювання миттєвих значень напруг.

Справедливе також зворотне твердження: якщо площа сусідніх секторів однакова система працює в режимі, що встановився.

Оскільки площа виміряних через рівні проміжки часу секторів залишається постійною, сума площ секторів у період дорівнює площі еліпса. Це дозволяє визначити кількість секторів, розділивши площу еліпса на площу одного сектора. Якщо відомий проміжок часу через який заміряються напруги, визначити період можна помноживши тривалість цього проміжку на обчислене число секторів, а знаючи період визначити частоту, таким чином:

$$w = 2 \frac{\Delta s}{ab\Delta t}. \quad (2.10)$$

Розглянемо описану залежність з прикладу комп'ютерного моделювання однофазного провалу напруги, викликаного коротким замиканням, серед Simulink MATLAB (рисунок 2.4).

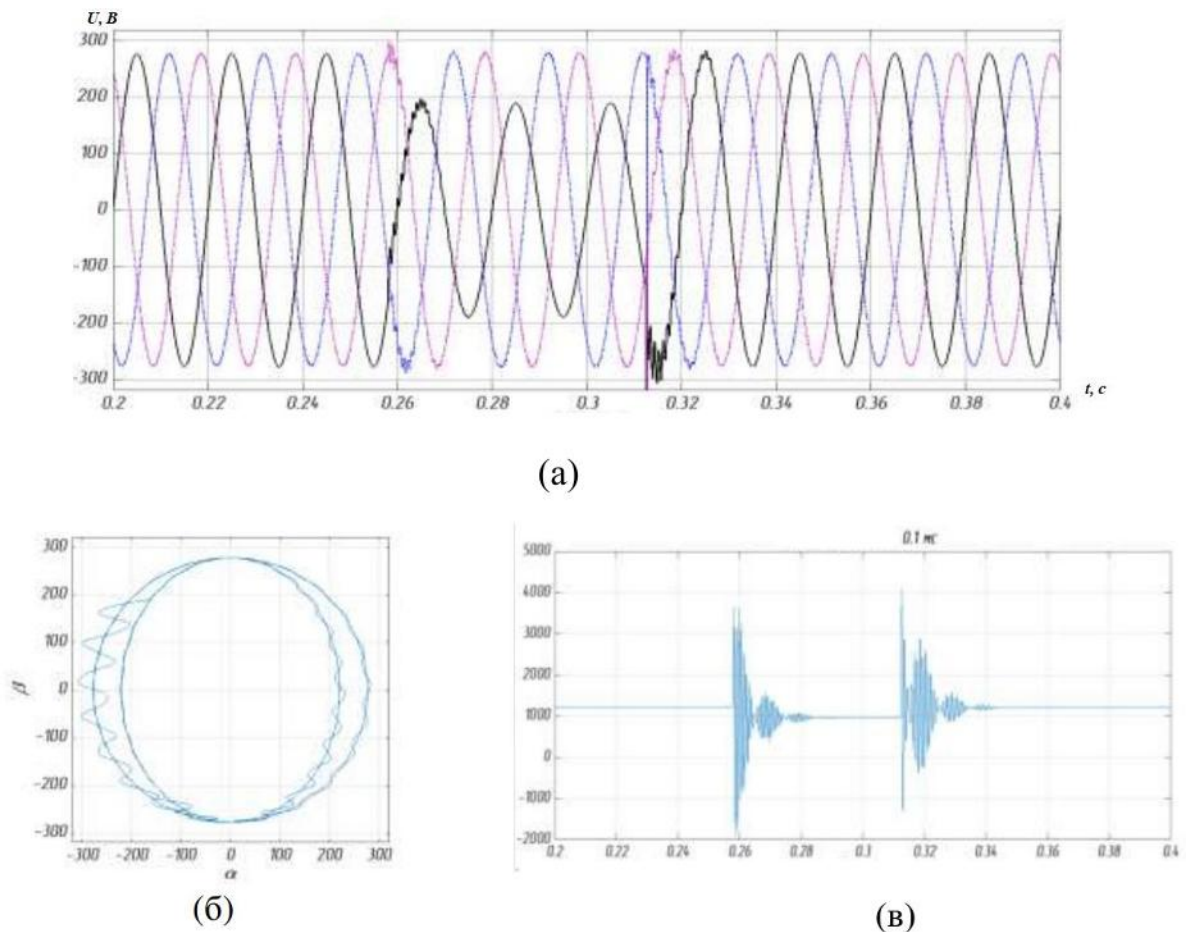


Рисунок 2.4 – Однофазний провал напруги (а), годограф узагальненого вектора напруги (б), зміна площі секторів узагальненого вектора напруги (в)

Коротке замикання в розподільній мережі часто супроводжується виникненням коливальних складових, обумовлених власною індуктивністю та ємністю ліній електропередачі та параметрами обладнання, що живиться. Рисунок 2.4 (б) показує вплив коливань, що виникають, на форму годографа узагальненого вектора. Траєкторія узагальненого вектора під час провалу напруги набуває форми еліпса, потім, після відновлення непруження, форму кола. Перехід від однієї форми до іншої супроводжується коливаннями, що, у свою чергу, викликає значні коливання в площі секторів (рисунок 2.4 (в)). Слід зазначити, що від'ємні значення щодо площі секторів обумовлені тим, що з розрахунках у роботі площа секторів визначається як половина векторного добутку пари координат, виміряних послідовно. Однак, можна звернути увагу на те, що крім коливальної складової результати вимірювань включають постійну складову. Це добре видно при усередненні площі секторів на тимчасовому інтервалі, що дорівнює половині періоду живлення напруги (рисунок 2.5).

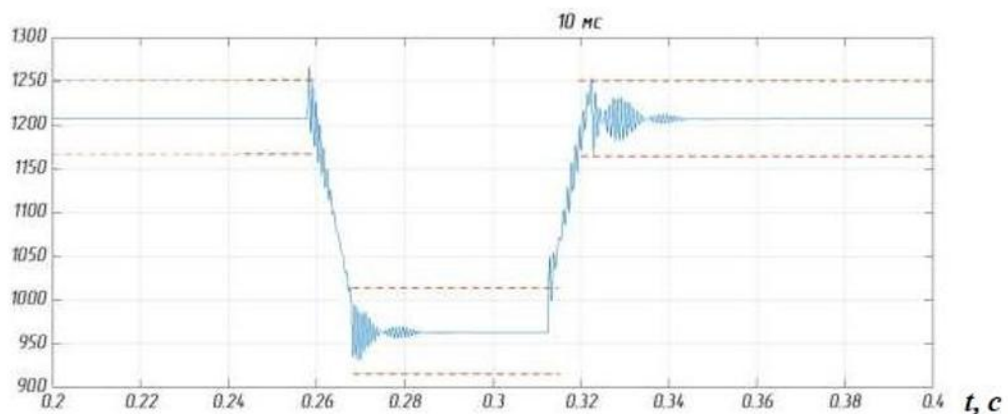


Рисунок 2.5 – Площа секторів узагальненого вектора напруги, усереднена на інтервалі у половину періоду основної частоти

З початком провалу напруги середня площа секторів зменшується, потім стабілізується на рівні, що відповідає провалу напруги, потім знову збільшується до нормальних значень. Таким чином у розділі наведено теоретичне обґрунтування застосування властивості сталості середньої площі секторів узагальненого вектора для визначення режимів, що встановилися.

Крім цього показано, що ця властивість може бути використана для обчислення частоти напруги мережі, що буде використано далі для оцінки точності визначення параметрів напруги живлення.

2.5 Модернізований алгоритм визначення параметрів годографа узагальненого вектора напруги

У режимі з'являється можливість визначити параметри годографа узагальненого вектора напруги, а, отже, і параметри напруги живлення. На початку розділу дано опис ітераційного алгоритму, вперше запропонованого в [8] для визначення компонентів прямої та зворотної послідовності напруги, а також типів провалів напруги. Наприкінці розділу викладено спосіб оцінки помилки визначення параметрів напруги живлення і модернізований для вирішення цього завдання алгоритм.

Використовуючи канонічне рівняння еліпса (рівняння 2.5), можна визначити величину півосей еліпса, знаючи координати будь-яких двох точок вектора напруги (рівняння 2.8). Відповідно, для масиву з n координат точок у просторі координат вектора напруги можна вирішити $n - 1$ систем рівнянь та отримати $n - 1$ можливих величин півосей еліпса. Вірні величини півосей будуть отримані тільки в тому випадку, якщо координати узагальненого вектора напруги наведено КСК.

Ітераційний алгоритм призначений визначення кута зсуву КСК щодо осі α і визначення величин півосей еліпса a і b . Для цього потрібно перевести $\alpha\beta$ координати узагальненого вектора напруги в КСК (позначену $\alpha'\beta'$) «повернувши» їх на кут Ψ , застосувавши рівняння 2.2. Так як кут Ψ заздалегідь невідомий обчислення проводяться для деякої кількості m кутів зсуву КСК щодо СК $\alpha\beta$. Схематично принцип роботи алгоритму продемонстровано рис.2.6 (а). Парою індексів n і m позначені поточні координати узагальненого вектора, наведені до передбачуваної КСК. Ефект поступового зміни кута Ψ відображено рис. 2.6 (б), зрозуміло, що з деякому значенні цього кута дані виявляються наведеними до КСК.

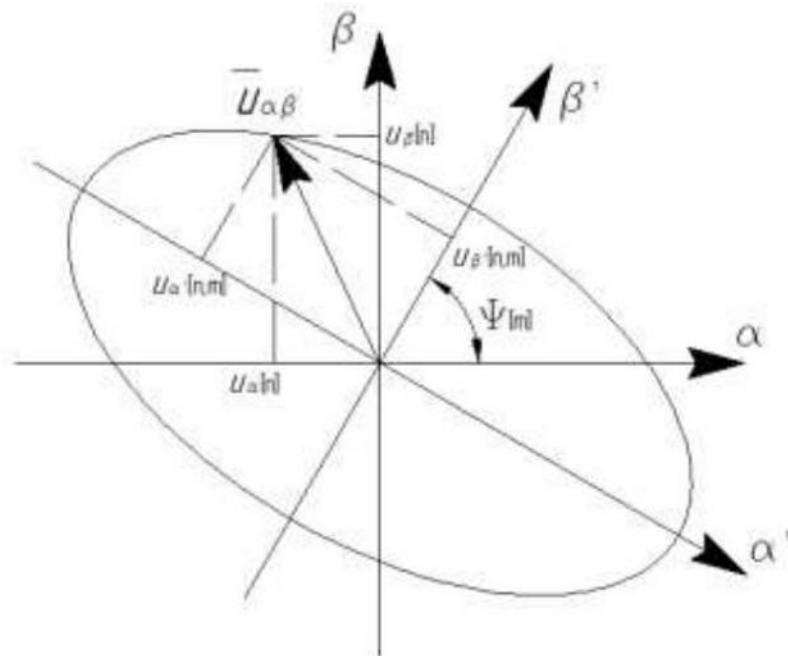


Рисунок 2.6 – Передбачувана траєкторія узагальненого вектора трифазної мережі

Якщо здійснено m умовних поворотів осей координат, відомо $m \times (n - 1)$ можливих довжин півосей еліпса. Для подальшого аналізу визначаються середні кожної з передбачуваних проєкцій величини півосей еліпса:

$$a_{cp}[m] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} a[i], \quad b_{cp}[m] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} b[i], \quad (2.11)$$

де $a_{cp}[m]$, $b_{cp}[m]$ - середньоарифметичні величини великої та малої півосей еліпса, що відповідають m -му куту «повороту» системи координат.

Для кожного з m «поворотів» визначається середньоквадратична помилка $E[m]$ обчислена при підстановці отриманих значень канонічне рівняння. Вибирається кут та довжини півосей, яким відповідає найменша помилка обчислення:

$$E[m] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_{\alpha}^2[i, m]}{a_{cp}^2[m]} + \frac{u_{\beta}^2[i, m]}{b_{cp}^2[m]} - 1 \right)^2}. \quad (2.12)$$

Як було показано в попередньому розділі параметри годографа узагальненого вектора напруги (a , b), можна використовувати для визначення

частоти напруги живлення. Так як у формулі 2.10 визначення частоти використовуються довжини півосей напруги, то помилка їх визначення призведе до помилки визначення частоти напруги. Так як при провалах напруги частота напруги не змінюється можна обчислити відносну помилку визначення частоти напруги:

$$\Delta w = \frac{|w_{\text{внч}} - w_{\text{зад}}|}{w_{\text{зад}}}, \quad (2.13)$$

де Δw – помилка визначення частоти напруги живлення, $w_{\text{внч}}$ – обчислена частота напруги живлення, $w_{\text{зад}}$ – відома частота напруги живлення в розрахунках приймалася рівною 314,16 рад/с.

Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення [11] встановлює вимоги до відхилення частоти напруги живлення в синхронізованих енергосистемах $\pm 0,2$ Гц протягом 95% інтервалу часу в один тиждень і $\pm 0,4$ Гц протягом 100% інтервалу часу в один тиждень. В ізольованих енергосистемах вимоги нижче, відхилення частоти можуть досягати 5 ± 1 Гц протягом 95% інтервалу часу за один тиждень і ± 5 Гц протягом 100% інтервалу часу за один тиждень. Енергосистеми проектуються і керуються так, щоб забезпечувати ці норми, тому справедливо очікувати, що частота напруги, що живить електропривод, буде перебувати в межах 49-51 Гц 95% роботи електроустановки.

На підставі викладеного вище, помилка обчислення частоти з використанням параметрів годографа узагальненого вектора напруги може бути використана для оцінки точності роботи ітераційного алгоритму. Для різного числа вимірювань напруги n помилка буде різною, зі збільшенням числа аналізованих даних помилка зменшуватиметься, практичний інтерес представляє визначення мінімальної кількості вихідних даних, при якому величина помилки визначення параметрів напруги Δa і Δb не перевищує максимально допустиме значення. Для цього пропонується оцінювати помилку визначення частоти Δw , порівнюючи її з деякою заздалегідь заданою величиною $\Delta w_{\text{дон}}$ і вважати параметри напруги обчисленими з достатньою

точністю при зниженні величини помилки нижче цього значення. Таким чином, вирішується поставлене у роботі завдання оцінки точності обчислень предиктивного алгоритму. Початкова кількість вимірювань дорівнює 4, оскільки це мінімальна кількість даних, необхідні однозначного визначення параметрів напруги.

Після визначення помилки обчислення частоти напруги живлення з використанням рівнянь 2.10 і 2.13, вона порівнюється з припустимою помилкою $\Delta w_{\text{доп}}$. Якщо обчислена помилка перевищує допустиму, потрібно збільшувати кількість даних, що у розрахунку. Цей процес повторюється доти, доки умова не буде виконано. При зниженні помилки нижче за допустиму, розраховані параметри годографа вектора напруги виводяться для подальшого аналізу.

2.6 Отримання миттєвих значень напруги за даними про годограф узагальненого вектора напруги

Знаючи параметри годографа узагальненого вектора та користуючись властивістю синусоїдальності проєкцій у КСК неважко визначити миттєві значення прямої та зворотної послідовностей фазної напруги (або іншої електричної величини) за період. Значення прямої та зворотної послідовності фазних напруг можна визначити за формулою:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \sin(w\Delta tn - \Psi) + A_2 \sin(w\Delta tn - \Psi) \\ A_1 \sin(w\Delta tn - \Psi + 2\pi/3) + A_2 \sin(w\Delta tn - \Psi - 2\pi/3) \\ A_1 \sin(w\Delta tn - \Psi - 2\pi/3) + A_2 \sin(w\Delta tn - \Psi + 2\pi/3) \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Або розрахувати масив значень проєкцій на осі КСК і перетворити їх на масив abc координат, відповідних миттєвим значенням напруг трифазної мережі [27].

$$\begin{bmatrix} u_a[n] \\ u_b[n] \\ u_c[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) \\ \sin(\Psi) & \cos(\Psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \cos(\omega t[n] - \Psi) \\ b \sin(\omega t[n] - \Psi) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Надалі з отриманих масивів миттєвих напруг прямої та зворотної послідовності обчислюються масиви лінійних напруг.

Висновки за розділом 2

1. Показано, що для визначення параметрів напруги живлення в несиметричних режимах доцільно використовувати представлення напруги мережі у вигляді узагальненого вектора, так як годограф вектора описується еліпсом, величини півосей якого пов'язані з компонентами прямої і зворотної послідовності.

2. Доведено сталість середнього значення секторів, що відкладаються узагальненим вектором напруги за рівні проміжки часу в режимі, що встановився.

3. Запропоновано спосіб визначення частоти напруги живлення з використанням параметрів годографа узагальненого вектора напруги, заснований на порівнянні площі годографа узагальненого вектора з середньою площею секторів, що відкладаються ним за рівні проміжки часу.

4. Аналіз результатів роботи модернізованого алгоритму показав, що при допустимій помилці визначення частоти в 5%, максимальна помилка визначення величини півосей еліпса, а значень величини напруження склала 6%.

3 ПРЕДИКТИВНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУГИ ЛАНКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ПАСИВНИМ ВИПРЯМДЯЧЕМ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРУГИ

3.1 Некерований випрямляч у структурі сучасного електроприводу

Розвиток систем векторного керування визначив структуру сучасного електроприводу. Асинхронні та синхронні електродвигуни в сучасних умовах керуються за допомогою частотного перетворювача, що перетворює постійну напругу на напругу заданої частоти, фази та амплітуди. Постійна напруга виходить шляхом випрямлення трифазної напруги мережі. Стандартним рішенням при проектуванні електроприводу малої та середньої потужності на високу та середню напругу є шестипульсний випрямляч на основі напівпровідникових діодів [14].

Структура перетворювача частоти зображено рис. 3.1.

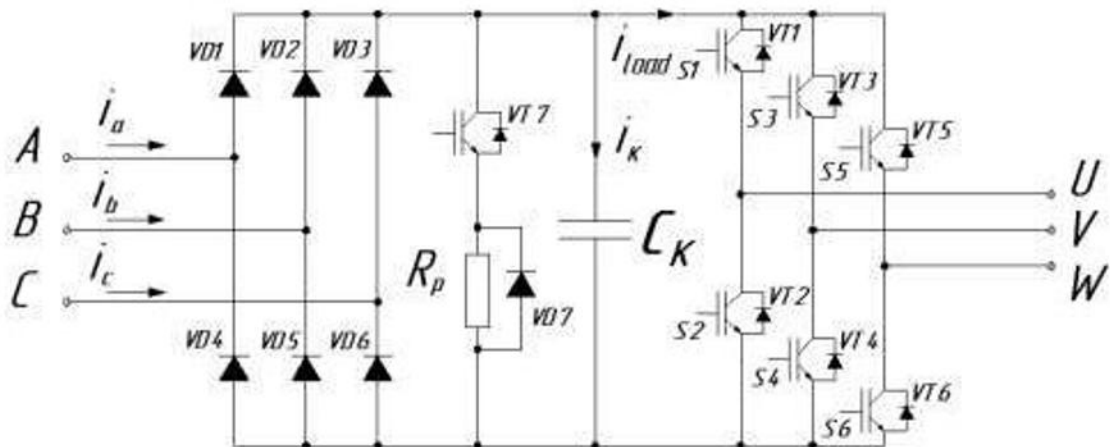


Рисунок 3.1 – Структура перетворювача частоти з пасивним шестипульсним випрямлячем та інвертором напруги

Вхідні струми перетворювача рис. 3.1 позначені i_a , i_b і i_c . Струм протікає через конденсатор позначений i_{do} , а струм навантаження позначений i_{load} . У кожен момент часу виявляються відкриті тільки два діоди, до яких прикладено найбільшу лінійну напругу u_l з найбільшою амплітудою, але тільки в тому випадку, якщо вона більша за напругу у ланці постійного струму,

це обумовлює нелінійність вхідних струмів такого перетворювача і пульсації постійної напруги.

Також до складу ланки постійного струму ПЧ включений розрядний резистор на якому відбувається розсіювання енергії у випадках, коли напруга ланки постійного струму перевищує припустиме, наприклад при роботі двигуна в режимі рекуперації.

Постійна складова напруги на виході некерованого шестипульсного випрямляча у симетричному режимі визначається виразом [15]:

$$U_k = \frac{3}{\pi} u_{L\max}, \quad (3.1)$$

Підтримка постійного рівня напруги на конденсаторі необхідна керування двигуном за допомогою інвертора. При сталості напруги в ЛПС модуль силових ключів працює як інвертор напруги. На рис. 3.2 схематично зображено потік потужності через ланку постійного струму. Конденсатор, як правило, має незначний тангенс діелектричних втрат, тому практично не споживає активної потужності [16], що зумовлює справедливість рівності:

$$P_{k. \text{ вх.}} = P_{k. \text{ вих.}} \quad (3.2)$$

де $P_{k. \text{ вх.}}$ – активна потужність на вході ланки постійного струму,

$P_{k. \text{ вих.}}$ – активна потужність на виході ланки постійного струму.

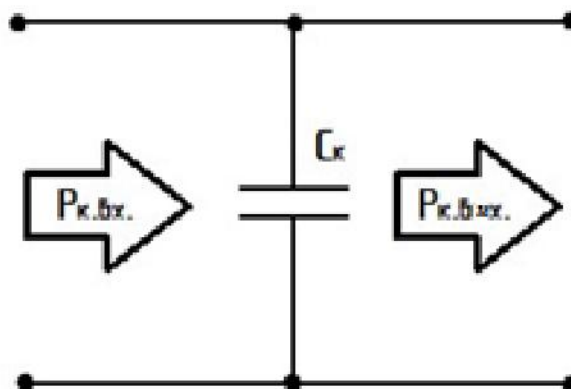


Рисунок 3.2 – Потік потужності у ланці постійного струму

Зрозуміло, що при зниженні напруги у ланці постійного струму, знижується здатність приводу формувати необхідні струми в обмотках статора і максимальний момент сили на валу двигуна. При провалі напруги постійна складова напруги ланки постійного струму знижується, а величина пульсацій збільшується, що може призвести до зупинки приводу при спрацьовуванні реле ЗМН, що було докладно описано в першому розділі.

3.2 Розрахунок параметрів напруги ланки постійного струму під час провалів напруги

Розглянемо спосіб визначення параметрів напруги ЛПС за відомими лінійними напругами і потужністю, що споживається двигуном. Вираз 3.1 виводиться при припущенні про те, що амплітуди лінійної напруги однакові і зсув фаз між ними залишається незмінним, воно не застосовується при визначенні напруги ланки постійного струму при провалах напруги. Для адекватної оцінки параметрів напруги ланки постійного струму (його постійної складової, а також її мінімального та

$$\begin{cases} u_{\text{л}} - u_{\text{к}} = 2 \cdot i_{\text{л}} R_{\text{л}} + 2 \cdot L_{\text{л}} \frac{di_{\text{л}}}{dt} + 2 \cdot u_{\text{vd}}; \\ i_{\text{к}} = C \frac{du_{\text{к}}}{dt}; \\ i_{\text{л}} = i_{\text{н}} + i_{\text{к}}; \\ i_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{u_{\text{к}}}. \end{cases}, \quad (3.3)$$

де $u_{\text{л}}$ - миттєве значення лінійної напруги, $R_{\text{л}}$ - активний опір лінії електропередачі, що розглядається, $L_{\text{л}}$ - індуктивність лінії електропередачі, що розглядається, $i_{\text{н}}$ - вхідний струм інвертора напруги, $P_{\text{н}}$ - активна потужність навантаження, C - ємність конденсатора ЛПС, $i_{\text{к}}$ - струм через конденсатор, u_{vd} - пряме падіння напруги на діодах випрямляча.

Потужність, споживана двигуном $P_{\text{н}}$ визначається сумою потужності на валу двигуна $P_{\text{дв}}$, визначається як добуток частоти обертання ротора ω_r і моменту сили M , потужності активних втрат в обмотках статора і ротора P_R і

потужності втрат на перемагнічування P_m [14]. При цьому при виході двигуна на робочу точку швидкість і момент двигуна постійні, як і струми в обмотках статора і ротора, що дозволяє проводити обчислення параметрів напруги ЛПС, з припущення, що поточне споживання потужності є постійним:

$$P_n = P_{об} + P_R + P_m = w_r M + P_R + P_m = const \quad (3.4)$$

Слід зазначити, що це припущення не є обмеженням, тому що у випадку, якщо відома динаміка зміни споживання потужності, також можна використовувати запропонований спосіб розрахунку підставивши в систему рівнянь 3.4 деяку функцію $P_n(t)$. Далі в роботі, як найбільш загальний випадок, розглядається тільки робота двигуна в режимі, що встановився.

Обчислення параметрів напруги ланки постійного струму провадиться методом послідовних наближень [5]. Для цього необхідно знати споживану потужність, ємність конденсатора у ланці постійного струму та параметри лінії електропередачі.

Обчислення триває, доки постійна складова струму конденсатора $i_{до}$ за період не дорівнюватиме 0, що відповідає встановленому режиму:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_{до} dt = 0, \quad (3.5)$$

де T – період напруги живлення, $i_{до}$ – струм конденсатора.

Струм конденсатора розраховується за кожної ітерації. При розрахунку напруги, що прикладається до діодів за першим рівнянням системи 3.3, враховується падіння напруги в лінії живлення, пряме падіння напруги на діодах і вплив перенапруг, що виникають через індуктивність лінії при зниженні струму до нуля:

$$u_{откр.л}[k] = u_{л}[k] - 2Ri_{л}[k] + 2L_{л} \frac{i_{л}[k]}{\Delta t}, \quad (3.6)$$

де $u_{відкр.л}$ – напруга, що прикладається до діодів, Δt – прийнятий крок часу.

Крок часу Δt можна прийняти рівним проміжку часу між вимірами, або збільшити для прискорення розрахунку. У випадку, якщо напруга на

конденсаторі u_k більша за найбільшу напругу прикладається до діодів, то конденсатор розряджається на навантаження і розрядний опір.

Далі за допомогою четвертого рівняння в системі 3.3 визначається струм навантаження. Так як швидкість зміни напруги пропорційна струму конденсатора, зрозуміло, що підвищення споживаної потужності призводить до збільшення амплітуди коливань напруги і інакше, він заряджається струмом, що визначається за допомогою третього рівня.

Приріст струму лінії на $\Delta i_l [k]$ кожному кроці визначається за формулою

$$\Delta i_l [k] = \frac{u_l [k] - 2 \cdot R_l \cdot i_l [k] - u_k [k]}{2L_l} \Delta t. \quad (3.7)$$

Відомий зарядний струм дозволяє розрахувати наступне значення напруги ланки постійного струму $u_k [k+1]$ з другого рівняння в системі 3.3:

$$u_k [k+1] = \frac{i_k [k]}{C} \Delta t + u_k [k]. \quad (3.8)$$

З отриманого в ході розрахунків масиву вибирається максимальне, мінімальне значення та визначається постійна складова напруги ЛПС.

3.3 Моделювання впливу провалів напруги різного типу на напруги ланки постійного струму електроприводу з векторним керуванням

Для підтвердження дієвості запропонованого методу в умовах усіх типів несиметрії, що виникають під час провалів напруги, було проведено комп'ютерне моделювання. У середовищі Simulink MATLAB було зібрано модель асинхронного двигуна з векторним управлінням [15]. Структура моделі представлена рис. 3.3.

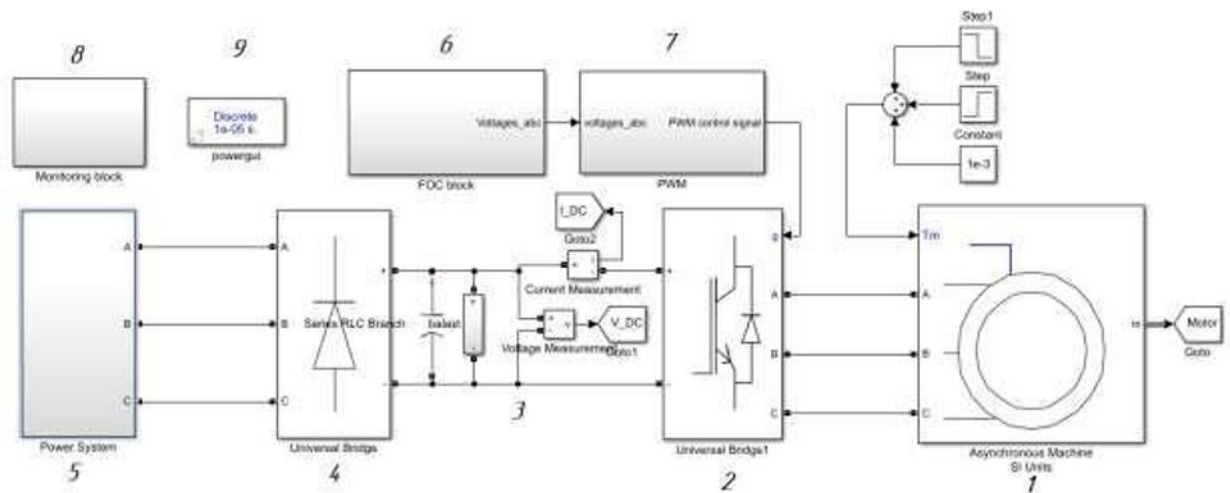


Рисунок 3.3 – Структура моделі асинхронного електроприводу з векторним керуванням

Як модель двигуна (блок №1 на рис. 3.3) був використаний стандартний блок Asynchronous Machine бібліотеки SimPowerSystems, що обчислює динаміку зміни струмів ротора і статора, потокозчеплення, швидкості та моменту на валу двигуна за відомими параметрами Т-схеми заміщення двигуна та даними про вхідні напруги двигуна. Як приклад розглянуто двигун, який використовується для приводу занурювального насоса ПЕД-10-103-М3. Параметри моделі представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – параметри двигуна, що моделюється

Номінальна потужність двигуна ($P_{ном.}$), кВт	14
Напруга живлення ($U_{ном.}$), В	0,4
Частота напруги (f), Гц	50
Число пар полюсів (z_p)	2
Індуктивність розсіювання статора та наведена індуктивність розсіювання ротора (L_s та L_r), мГн	0,35/5,5
Активний опір статора та наведений активний опір ротора (R_s і R_r), Ω	0,59/0,62
Взаємна індуктивність статора та ротора (L_m), мГн	35,4
Момент інерції двигуна (J), $\text{кг}\times\text{м}^2$	0,05
Коефіцієнт тертя двигуна ($K_{тр}$), $\text{Н}\times\text{м}\times\text{с}/\text{рад}$	6×10^{-3}

Перетворювач частоти також був зібраний на основі стандартних блоків Unersal Brige, що моделюють роботу інвертора напруги та випрямляча

відповідно (на рис. 3.3 позначені номерами 2 та 4 відповідно). Частота комутації ключів інвертора прийнята 40 кГц. Між ними приєднано ланку постійного струму (цифра 3) що складається з ємності та керованого розрядного резистора, а також блоки вимірювання та контролю.

Точка приєднання до електромережі (позначена цифрою 5) імітується джерелами напруги, опір системи електропостачання обрано таким чином, щоб струм короткого замикання в точці підключення до приводу мережі дорівнював 4 кА.

Цифрою шість позначений блок управління, що виконує наступні функції: перетворення миттєвих струмів статора в систему координат, що обертається, dq ; обчислення величини і кута повороту вектора потокосцеплення ротора r , моменту на валу двигуна і завдання для d і q складових струму статора; формування модулюючих сигналів для ШІМ; керування розрядним резистором. Контури регулювання швидкості та струму представлені рис. 3.4.

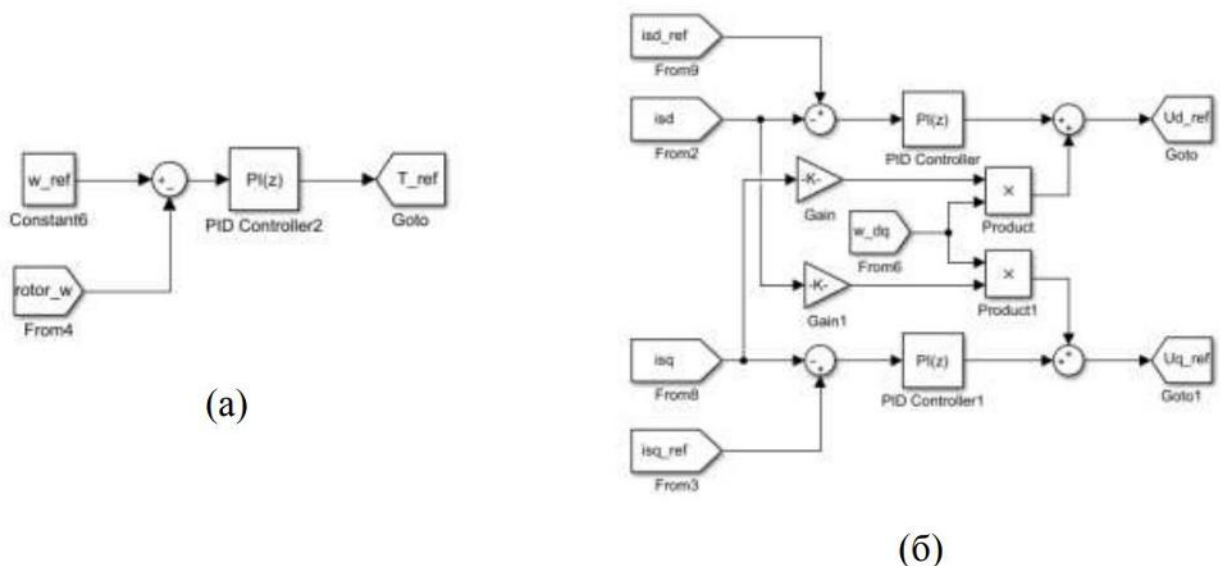


Рисунок 3.4 – Контури регулювання швидкості (а) та струму (б)

Регулювання швидкістю приводу здійснюється наступним чином: завдання швидкості (при моделюванні 125,6 рад/с, що відповідає номінальній швидкості обертання двигуна) порівнюється з вимірним датчиком швидкості

значенням, після чого неузгодженість подається на вхід III регулятора, що формує завдання по моменту на валу двигуна $M_{зад}$. Із заданого моменту формується завдання для складової струму статора:

$$i_{q\text{ зад}} = \frac{3}{2} \frac{1}{z_p} \frac{M_{зад}}{\Psi_r} \left(1 + \frac{L_r}{L_m} \right). \quad (3.9)$$

Однак для цього необхідно попередньо обчислити кут повороту потокозчеплення ротора r в системі координат α , пов'язаної зі статором, і величину потоку ротора. Потік ротора визначається з поточної величини складової струму статора:

$$\Psi_r = i_{sd} L_m. \quad (3.10)$$

Кут потокозчеплення ротора визначається інтегруванням швидкості обертання магнітного поля двигуна за часом, яка обчислюється з відомої швидкості обертання ротора w_r з урахуванням ковзання Δw , так як система, що обертається dq система координат орієнтується по вектору потокозчеплення ротора :

$$\theta_r = \int (w_r + \Delta w) dt. \quad (3.11)$$

При цьому ковзання пропорційно поточному моменту M на валу двигуна:

$$\Delta w = \frac{2}{3} \frac{1}{z_p} \frac{R_r}{\Psi_r^2} M. \quad (3.12)$$

Поточний момент, у свою чергу, визначається із складової струму статора i_{sq} :

$$M = \frac{2}{3} z_p \frac{i_{sq} \Psi_r}{(1 + L_r/L_m)}. \quad (3.13)$$

Двигун керується так, щоб підтримувати потокозчеплення ротора постійним. Завдання по потоку $\Psi_{r\text{ зад}}$ визначене за критерієм мінімуму струму статора під час роботи двигуна в номінальній робочій точці визначає завдання складової струму статора $i_{sd\text{ зад}}$ (рівняння 3.10).

$$\Psi_{r\text{ зад}} = \sqrt{\frac{2 M(L_r + L_m)}{3 z_p}}, \quad (3.14)$$

Розузгодження вимірних струмів з формованим завданням подається на ПІ-регулятори струмів, налаштовані однаково. Потім проводиться компенсація впливу контурів регулювання один на одного, для цього ортогональні компоненти струму множаться на відповідні коефіцієнти та швидкість обертання СК сумісної з вектором потокозчеплення ротора (рисунок 3.4 (б)). Коефіцієнти регуляторів контурів струму та напруги представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри регуляторів струму та швидкості

Коефіцієнт посилення пропорційної складової регулятора швидкості	0,3
Коефіцієнт посилення інтегральної складової регулятора швидкості	50
Коефіцієнт посилення пропорційної складової регуляторів струму	13
Коефіцієнт посилення інтегральної складової регуляторів струму	10^4

Діаграма рис. 3.5 показує динаміку зміни швидкості обертання двигуна і моменту на валу двигуна зі збільшенням навантаження, з її зниженням. Видно, що система управління відпрацьовує збурення за десяти частки секунди, причому перерегулювання не перевищує 5% від завдання.

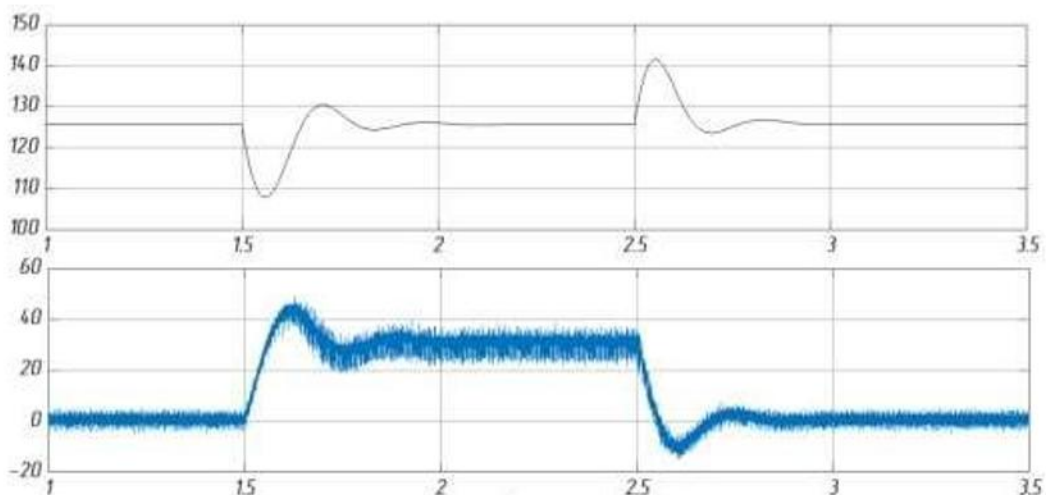


Рисунок 3.5 – Зміна механічних параметрів приводу

При нормальній напрузі в точці загального підключення постійна складова напруги у ланці постійного струму підтримується на нормальному рівні, що визначається рівнянням 3.8 (рисунок 3.6).

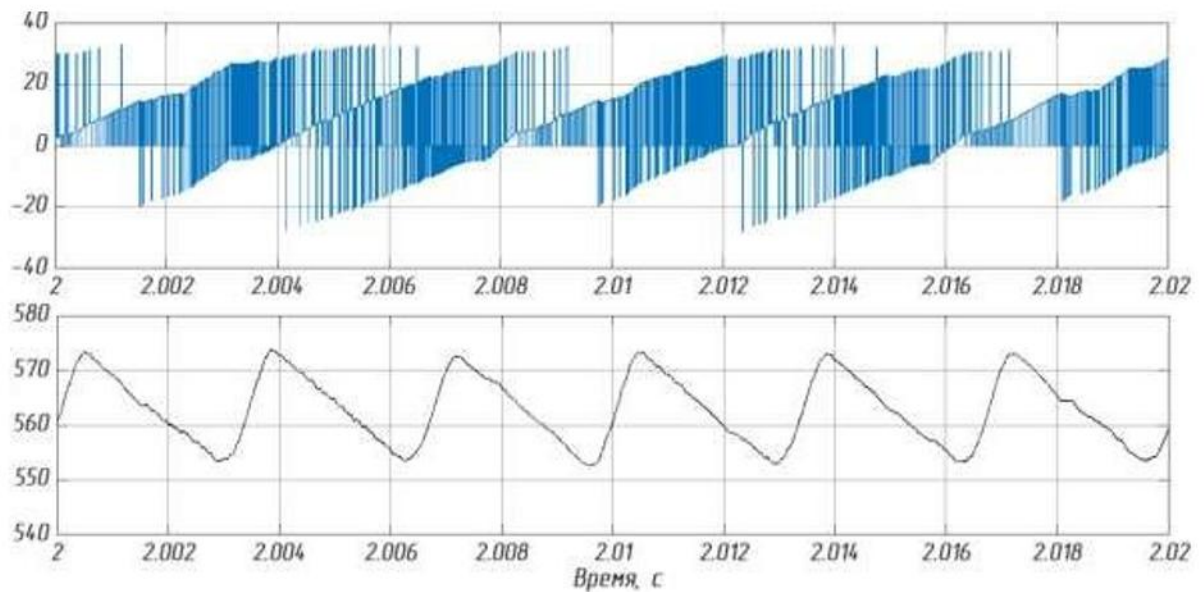


Рисунок 3.6 – Струм та напруга ЛПС приводу під навантаженням при нормальній напрузі

Крім постійної складової помітні пульсації з частотою в шість разів перевищує частоту напруги живлення трифазної мережі. Вхідний струм інвертора напруги має також яскраво виражену постійну складову, що підтверджує припущення 3.4.

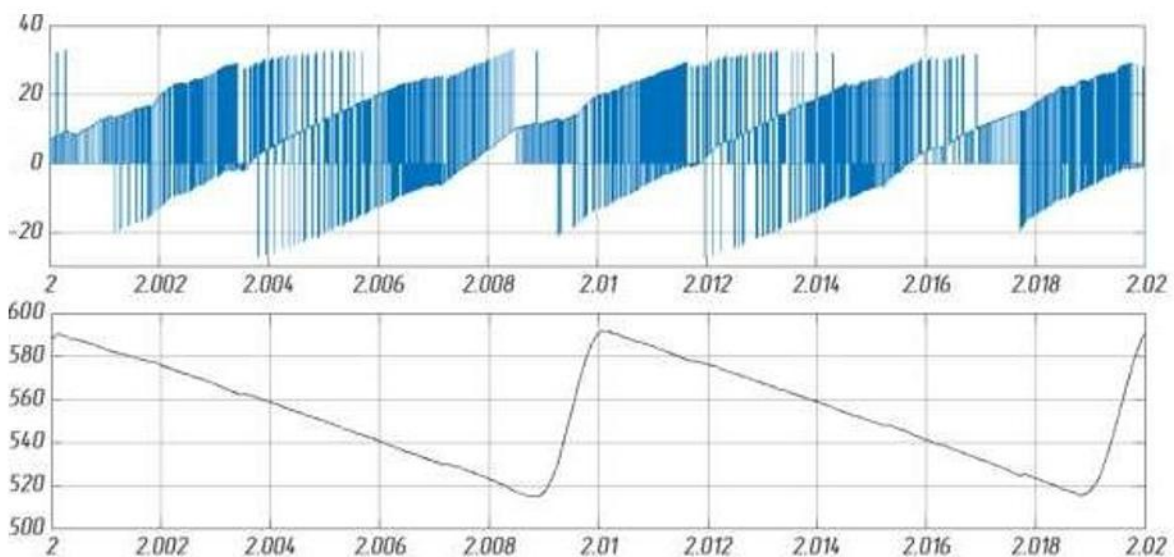


Рисунок 3.7 – Струм і напруга ЛПС приводу під навантаженням під час провалу напруги

При моделюванні однофазного провалу напруги глибиною 20% напруга на конденсаторі зберігає постійну складову, проте пульсації змінюються. При однофазному провалі напруги у ланці постійного струму частотно-регульованого приводу спостерігається не шість пульсацій з невеликою амплітудою за період, а дві з амплітудою, що значно перевершує необхідну для нормальної роботи електроприводу. При цьому зберігається постійна яскраво виражена складова вхідного струму інвертора, що дозволяє говорити про справедливість рівняння 3.4 при провалах напруги.

Розроблена комп'ютерна модель дозволила визначити параметри ЛПС при провалах напруги різного типу і порівняти отримані дані з результатами роботи ітераційного алгоритму. моделюванні дорівнював $30 \text{ Н} \times \text{м}$.

У таблиці 3.3 дано порівняння параметрів напруги, визначених при різних типах провалів напруги в трьох фаз, зі зміною кута зсуву фаз, типу D – провал напруги в одній фазі зі зміною кута зсуву фаз, типу E – двофазний провал напруги, типу F і G – несиметричний провал напруги в трьох фазах.

Номери рядків таблиці відповідають 1 – максимальна за період напруга у ланці постійного струму у вольтах, визначена за допомогою моделювання в середовищі Simulink MATLAB, 2 – максимальна за період напруга у ланці постійного струму у вольтах, визначена за допомогою запропонованого алгоритму, 3 – відносна помилка алгоритму у визначенні максимального за період напруги у ланці постійного струму у відсотках; 4 – постійна складова напруги ланки постійного струму у вольтах, визначена за допомогою моделювання в середовищі Simulink MATLAB; 5 – постійна складова напруги ланки постійного струму у вольтах, визначена за допомогою запропонованого алгоритму, 6 – відносна помилка алгоритму у визначенні постійної складової напруги у ланці постійного струму у відсотках, 7 – мінімальна за період напруга у ланці постійного струму у вольтах, визначена за допомогою моделювання в середовищі Simulink MATLAB; 8 – мінімальна за період напруга у ланці постійного струму у вольтах, визначено за допомогою

запропонованого алгоритму, 9 - відносна помилка алгоритму у визначенні мінімального за період напруги у ланці постійного струму у відсотках.

Таблиця 3.3 – Порівняння результатів моделювання зі значеннями, отриманими під час роботи алгоритму

№ п/п	A	B	C	D	E	F	G
1	522,1	594,1	556,5	501,7	533,4	622,6	556,7
2	511,5	594,89	557,6	503,1	534,8	626,76	552,5
3	2,03	0,13	0,20	0,28	0,26	0,67	0,75
4	501,2	554,1	526,3	483,4	502,6	584,5	512
5	501,2	553	527,9	483,5	500	588,26	510,7
6	0	0,20	0,30	0,02	0,52	0,64	0,25
7	476	514,5	496,6	464,3	470,8	547,9	469,6
8	491,2	507,2	494,6	458,6	465,4	547,65	464,9
9	3,19	1,42	0,40	1,23	1,15	0,05	1,00

Максимальна помилка роботи алгоритму порівняно з моделюванням у середовищі Simulink MATLAB склала 3,19% для мінімальної напруги у ланці постійного струму при симетричному провалі напруги у трьох фазах. Параметри напруги ЛПС за інших типах провалів напруги визначені з точністю щонайменше 1,5%, що свідчить про адекватність обраного способу розрахунку.

Висновки за розділом 3

1. Описаний спосіб розрахунку параметрів напруги ланки постійного струму, що дозволяє, на підставі даних про поточне споживання енергії електродвигуном і про напругу, що живить ЧРП, визначити динаміку зміни напруги конденсатора ЛПС, його постійну складову, максимальне і мінімальне значення.

2. Розроблено комп'ютерну модель та проведено комп'ютерне моделювання роботи асинхронного електроприводу з частотним регулюванням при провалах напруги різної глибини та типу.

3. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання показав, що максимальна помилка роботи запропонованого алгоритму щодо параметрів напруги ЛПС становила 3,19%, що говорить про адекватність припущень запропонованих до розрахунку.

ВИСНОВКИ

У ході вирішення актуального завдання – забезпечення безперебійної роботи ЧРП при провалах напруги вирішені такі задачі:

1. Виконано аналіз частоти та наслідків виникнення провалів напруги, який показав, що до зупинки ЧРП технологічних установок промисловості найчастіше наводять провали напруги тривалістю від 50 мс та глибиною понад 20%, що визначає вимоги до швидкості та точності визначення параметрів провалу напруги для вжиття заходів щодо їх подолання.

2. Розроблено ітераційний алгоритм, що дозволяє за даними, зафіксованим за малу частину періоду напруги, отримати інформацію про величину прямої і зворотної послідовності напруги і оцінити точність проведених обчислень.

3. Для оцінки точності роботи запропонованого алгоритму було проведено комп'ютерне моделювання роботи ЧРП з діодним випрямлячем за умов провалів напруги різного типу. Порівняння результатів моделювання з результатами обчислень алгоритму показало, що алгоритм визначає параметри напруги ЛПС коректно. Максимальна помилка обчислень становила 3,2%, тоді як у інших випадках помилка не перевищила 1,5%.

4. Встановлено, що орієнтування вектора струму вектора напруги під час несиметричних провалів напруги призводить до спотворення вхідних струмів АВ з векторним керуванням. Для забезпечення постійної електромагнітної сумісності перетворювача з мережею живлення, запропоновано модифікувати структуру системи управління пристрою.

Література

1. Матвійчук В. А. Рубаненко О. Є. Гунько І.О. Діагностування електрообладнання. Вінниця: ВНАУ. 2020. 138 с.
2. Лазарєв В.С. Технічне обслуговування електричних машин і трансформаторів: навчальний посібник. – Київ: Аргумент Принт, 2010.
3. Рубаненко О.Є. "Діагностика і контроль електричних машин і апаратів". Київ: Ліра-К, 2007. - 320 с.
4. Бурковський Ю.М., Косолапов С.М. Електричні машини: навчальний посібник. – Київ: Видавничий дім "Техніка", 2016. – 210 с.
5. Громова Л.І., Горбатюк І.П., Жилиєва О.М. Основи діагностики електричних машин: навчальний посібник. – Київ: Логос, 2015. – 135 с.
6. Гладун А.М., Меркулов В.А. Експлуатація електрообладнання промислових підприємств: підручник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: Видавництво НТУУ «КПІ», 2012. – 413 с.
7. Чигаров А.І., Гончарук В.М., Рябошапка В.А. Електричні машини: підручник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: Вища освіта, 2013. – 235 с.
8. Зінкевич М.Д. Експлуатація електроустаткування: навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. - 265 с.
9. Романов Ю.І., Левченко А.В. Діагностика та ремонт електротехнічного обладнання: навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2013. 280 с.
10. Терещук О.В. Технічне обслуговування електроенергетичного обладнання. - Київ: Вид-во ТОВ "Техніка", 2016. – 116 с.
11. Голуб О.В. Електротехніка. Підручник для вищих навчальних закладів. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2018. – 211 с.
12. Макаров В.В. Трансформатори. Підручник. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2017. 236 с.
13. Калашников С.Г. Діагностика електромеханічних систем. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2014.

14. Wheeler A. R. Comparison of electronic Variable - Speed Drives // Intern at. Confer on Power Electronics Variable - Speed Drives - London, 1984, May. - P. 1- 6.
15. Siemens (ФРГ). Simovert - A. Stromzwischenkreis – Umrichter Drehzahlveranderbare Drthstromantriebe. - Katalog, Erlangen, 1983. - 88.
16. Jenschur H., Landeck W. Monovertter - ein Umrihter - system fur den Betrieb von Asynchon - Normmotoren. - Sonderdruck aus Technische Mitteilungen AEG -Telefunken, 69. Ig. , 1979, Heft 5/6.
17. Fuji Electric (Япония). Current Source Thyristor Inverters FRENIC - 2000 by Freguency Control. - Katalog, Tokyo, 1982.
18. Anders Ek. Variable - speed a. c. drives for severe environments // ASEA Journal. - 1978. - 51. - N2. - P 35 - 40.
19. Hitachi (Япония). Variable freguency inverter for motor drive system HITACHI AVAF INVERTER. - Katalog, Tokyo, 1982.
20. Agis H. , Frey H. Drehzahlseellung von Kafiglaufer - Asynchronmaschinen mit Stromzwisehenkreisum - richter - Electronic in der Abtriebstechnik, ELIN - zeitschrift, 31.
21. Ward E.E. Invertor suitable for operation over a range of frequeny // Proceedings of the IEE. - Vol. 111. - N8. - 1964. - P. 1423 - 1424.
22. Bitoleanu A. p-q power theory: Some theoretical and practical aspects/ A. Bitoleanu, M. Popescu, V. Suru // 2010 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, 2010. – C.74–79.
23. Aboutanios E. An adaptive clarke transform based estimator for the frequency of balanced and unbalanced three-phase power systems/ E. Aboutanios// 25th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2017, 2017. – C.1001–1005.
24. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning/ H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes – Piscataway,2007. – 379 с.

25. Arrillaga J. Flexible Power Transmission: The HVDC Options/ J. Arrillaga, Y.H. Liu, N.R. Watson 1-th ed./ J. Arrillaga – Chichester, 2007. – 362 с.
26. Ashourpouri A. Residential Voltage Dip and Swell Mitigation Using Plug-in Hybrid Electric Vehicle in Smart Grid/ J. Arrillaga, M. Dargahi, S.A.N. Niaki// Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2013. – 2013. – С.1–5.
27. Bagheri A. Improved characterization of multi-stage voltage dips based on the space phasor model/ A. Bagheri, M.H.J. Bollen, I.Y.H. Gu// Electric Power Systems Research. – 2018. – (154). – С.319–328.
28. Гладун А.М., Меркулов В.А. Експлуатація електрообладнання промислових підприємств: підручник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: Видавництво НТУУ «КПІ», 2012.
29. Чигаров А.І., Гончарук В.М., Рябошапка В.А. Електричні машини: підручник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: Вища освіта, 2013.
30. Зінкевич М.Д. Експлуатація електроустаткування: навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2016.
31. Романов Ю.І., Левченко А.В. Діагностика та ремонт електротехнічного обладнання: навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2013.
32. Терещук О.В. Технічне обслуговування електроенергетичного обладнання. - Київ: Вид-во ТОВ "Техніка", 2016.
33. Голуб О.В. Електротехніка. Підручник для вищих навчальних закладів. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2018.
34. Калашников С.Г. Діагностика електромеханічних систем. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2014.

Додатки

1 METHODS FOR IDENTIFYING VOLTAGE FALLS AND COMBATING THEM

The electric drive is able to maintain operability in conditions of voltage dips in various ways (for example, by switching to a weakened field mode), however, for this the control system must obtain data in advance on the dynamics of voltage changes in the DC link, which is possible if the voltage dip parameters are known .

1.1 Voltage dips in electrical networks from the point of view of indicators and standards of electrical energy quality

In normal operation, the effective voltage values of the three-phase network are within 10% of the nominal voltage U_{nom} . Accordingly, the maximum value of the normal voltage is equal to $1.1 U_{nom}$, and the minimum is $0.9 U_{nominal}$ voltage [3]. The intensity of the voltage dip is determined by the residual voltage of the network and its duration .

$$\Delta U = \frac{U_{ном} - U_{ост}}{U_{ном}} 100\% . \quad (1.1)$$

At the same time, if the residual voltage is less than 5% of the reference, it is considered that a voltage interruption has occurred.

The duration of the voltage dip t_p is determined by the time interval from the beginning of the voltage dip $t_{n.p.n.}$ until the voltage in all phases of the network is restored to the threshold value $t_{k.p.n.}$. The duration of voltage dips does not exceed 1 minute.

The main causes of voltage dips in low and medium voltage distribution networks are short circuits [5] and uncontrolled starting of heavy loads [6]. Short circuit current (SC) causes an additional voltage drop in the transmission line, which leads to a decrease in the voltage at the load connection point. Starting of heavy loads, such as induction and synchronous electric motors, also causes currents exceeding the nominal by 5-7 times, which also leads to an additional voltage drop in the line [4].

1.2 Frequency of voltage dips in electrical networks

Voltage dips are a common occurrence. According to statistics given in [4], voltage dips with a depth of up to 30% and a duration of up to 100 ms (5 periods of the supply voltage) are the most common in cable networks, the second most common are voltage dips with a depth of up to 30% and a duration of up to 500 ms. Among the remaining cases, voltage dips with a depth of about 40% and a duration of up to 25 periods of the supply voltage are most common.

For mixed networks, the statistics are similar, but voltage dips with a depth of up to 40% and a duration of up to 5 supply voltage periods are more common. Also, voltage dips with a depth of up to 100% (actually voltage interruptions) and a duration of up to 1 second (50 supply voltage periods) are widespread in such networks. These statistics are supported by data collected in other countries. Analysis of voltage dip data collected in Australia [5] over a period of nine years shows that 76% of the total number of voltage dips lasts less than 800 milliseconds (up to 40 power cycles), with 25% of the total number of voltage dips lasting 5-6 power cycles. It is also noted that in 70% of cases the depth of the dips does not exceed 30%.

1.3 Classification of voltage dips

The dynamics of voltage sags have been described in the literature many times and many examples of voltage changes recorded during voltage sags in power systems have been given. A voltage sag can be divided into three periods, the period of voltage reduction from the initial (normal) to the residual $T_{p.n.1}$, the period during which the reduced voltage $T_{p.n.2}$ is maintained and the period of voltage recovery to normal $T_{p.n.3}$. The period $T_{p.n.2}$ is usually much longer than the other two, so it is described in the classification of voltage dips [9]. Fig. 1.1 schematically depicts the stages of a voltage dip.

Voltage dips are divided into symmetrical and asymmetrical. A symmetrical voltage dip is a voltage dip during which the voltage of all three phases of the network decreases equally. The cause of this type of voltage dip can be a three-phase short circuit or direct start of a powerful motor. Other types of voltage dips are

asymmetrical, they are caused by single-phase and two-phase short circuits. The type of voltage dip, in addition to the causes of its occurrence, is affected by the neutral mode, the methods of connecting the transformer windings in the network where the short circuit occurred, and the connection of the windings in the load.

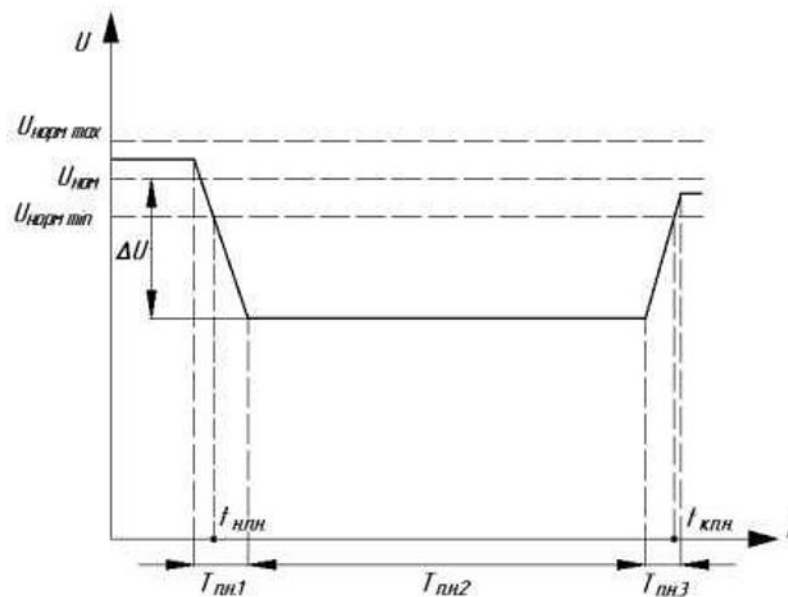


Figure 1.1 – Dynamics of changes in the actual voltage value in one of the phases of a three-phase network during a voltage failure

Traditionally, the symmetrical components method [5] is used to describe the asymmetric network operation modes. It most fully describes the network operation mode based on the available data on the phase voltage. The obtained values of the symmetrical components can be used to calculate the network operation mode.

Also for the classification of voltage dips it is convenient to use the ABC method [4, 6], based on the grouping of different voltage dips by the amplitude of the voltages of the three-phase network and the phase shift between them. Voltage dips are assigned to one of seven groups, each of which has certain properties when spreading through the electrical network, which greatly simplifies the analysis of the emergency mode.

Let us consider some properties and signs of voltage dips of different types. Voltage dip type A (Figure 1.2) is a symmetrical voltage dip with a three-phase short circuit, typical for networks with different neutral operating modes. Types B and E

describe single-phase and two-phase dips, the cause of which is short circuits to ground in a network with a dead-grounded neutral, which are more common than others [9].

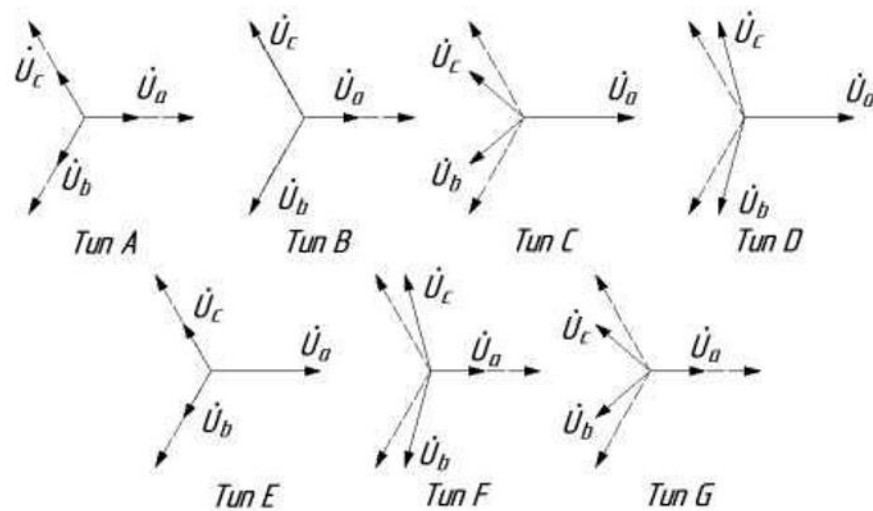


Figure 1.2 – Types of voltage dips in the ABC classification

Types C and D occur in electrical networks with a two-phase short circuit. Voltage dips of types F and G are typical for networks with an isolated neutral, the main cause of their occurrence is short interphase circuits [5].

In this paper, the ABC classification will be used when describing voltage dips, as it is very informative.

1.4 The effect of voltage dips on the electric drive as an element continuous production process

Short-term voltage dips, characterized by a duration of 50-200 ms and a depth of 10-40% (the most common in industrial electrical networks), can lead to disruption of the technological process, production downtime and product shortages due to disconnection of the frequency - controlled drive from the network [8]. This occurs due to a decrease in voltage in the DC link (DCS) of the drive and the operation of the undervoltage protection relay (UPR).

Single-phase voltage dips occurring in the 380 kV network at the MMK Metalurji plant were transferred through a transformer to the 34.5 kV intra-plant network, which supplies the electric drive of the synchronous motors of the hot-

drawing mill with frequency regulation, with a capacity of 6.5 to 9.5 kW. Asymmetry voltages at the input of frequency converters controlling the electric drive leads to a decrease in the DC voltage and disconnection of the converter from the network due to the operation of the minimum voltage protection. The stoppage of the main electric drives of the technological installation with the jamming of the strip in the rolling stands is eliminated within 2 hours, during this time the enterprise stops working, and the stopped workpiece is rejected. The problem of voltage dips in this case was solved by including an active static compensator in the enterprise network, which damps voltage dips when they occur.

At the oil refinery LLC “KINEF” from 2011 to 2014, an average of 24 voltage dips per year were recorded. In 80% of cases, dips with a depth of 20-40% and a duration of 100 ms were recorded [7]. During the accident, the minimum voltage protection relays (MVR relays) in the DC link of the frequency converters of asynchronous and synchronous electric drives were triggered and disconnected them from the network. After voltage restoration, the automatic restart system resumed the operation of the technological circuit. However, it was found that the automatic restart relay did not trigger when the voltage drop was less than 100 ms (5 periods of the supply voltage), while the MVR relay response time was on average 20-40 ms (1-2 periods of the supply voltage). Thus, the electric motors stopped during the voltage drop did not restart automatically and required manual restart.

Mining enterprises are often remote from the centralized power system, and production facilities are often dispersed, which makes their power systems vulnerable to voltage dips. The electric centrifugal pump installations at the field are powered by a 6 kV power line, the main part of the industrial network exceeds 10 km, the length of the branches reaches 5 km. In works [5 - 6] it is shown that voltage dips with a depth of 20% and a duration of about 180 ms led to the shutdown of submersible pumps, which led to a failure of technological processes, false triggering of network automation systems and, as a result, increased oil production losses.

The described problem is also encountered in underground mining, for example, the electric drive of a mine hoist is vulnerable to voltage dips [8]. To increase the resistance of the 315 kW electric drive to voltage dips, the authors propose using a battery of supercapacitors for short-term maintenance of the DC link voltage at a normal level for 100 ms.

The problem of voltage dips is also encountered in traction transport networks. An increase in traction loads leads to the connection of reserve rectifier units at traction substations for parallel operation, which is accompanied by a surge of currents. The voltage dips that arise in this case lead to false triggering of the complex of technical means of modernization and the rolling stock departure control device, as well as disconnection of feeders of non-traction consumers [2].

A similar problem was encountered at a gas pumping station in Norway [4]. The station is designed to export gas produced in the North Sea to consumers in Belgium, France, Germany, and the United Kingdom and is equipped with compressors driven by six synchronous motors with a capacity of 41.2 MW with a frequency- controlled electric drive. Asymmetric voltage dips, lasting from 50 to 150 milliseconds (2.5 to 7.5 periods of the supply voltage), caused an emergency stop of the compressors, which created a danger for the pipeline due to fluctuations in the gas flow rate, which caused additional heating of the pipes. The emergency stop of the compressors required a manual restart, which in turn increased the station's complexity. The described problem was solved by making adjustments to the converter control algorithm. The new control algorithm reduced the motor's rotation speed when the torque measured from its shaft dropped sharply, which is a characteristic sign of a voltage drop.

In addition to directly reducing the LPS voltage, the electric drive can disconnect from the network due to a decrease in the magnetic field strength that holds the contactor in the on position [9]. This is caused by the fact that the force that holds the contactor in the on position is proportional to the square of the voltage that powers the electromagnet.

There is a method for estimating the economic damage from voltage dips, and calculations obtained from observations of the operation of the Dutch power system [10] confirm the assumption that losses from voltage dips are directly proportional to the number of consumers who stop working in the event of a voltage drop. Therefore, increasing the resilience of each individual electrical installation leads to a reduction in losses from voltage dips.

The examples given show that the problem of stability during voltage dips is faced by electric drives in a wide power range from tens and hundreds of kilowatts to tens of megawatts. The danger for the normal operation of a frequency- controlled electric drive is a voltage dip with a duration of 50 ms and a depth of 20%.

1.5 Methods of combating voltage dips in industrial enterprise networks

The examples given in the previous section illustrate the relevance of the problem of voltage dips in distribution networks of enterprises. The described problem is not new and various strategies have been developed to reduce the impact of voltage dips on the operation of critical production facilities. There are two different classes of solutions to this problem. The first class includes solutions related to the optimization of the electrical network to minimize the area of distribution, depth and frequency of voltage dips. The second group of solutions is aimed directly at overcoming voltage dips by means of electric drives. In this section, we will consider the first group of methods.

The cardinal effect of short circuits on the formation of voltage dips at the load connection point is reduced by the method of dividing the intra-factory network of a high-voltage enterprise into independent circuits, the connection between which is maintained through an external high-voltage power supply network [1 3] devices at substations and in switchboards, which leads to an increase in costs for electrical equipment.

As a way to combat voltage dips, it is proposed to use the existing relay protection and automation system at the enterprise, for example, to automatically switch on the reserve (ATS) in the event of a voltage drop [9].

a step-up transformer (SVT) can be used. The primary winding of the SVT is connected to the power transmission line in parallel, and the secondary winding in series, so that the voltage on the secondary winding is added to the voltage at the transformer connection point. In normal operation, the transformer compensates for the voltage drop of the power transmission line. In the event of a failure, the additional voltage ensures the normal operation of the equipment connected to the network. Known controlled SVTs are able to switch the number of turns in the primary winding, thereby regulating the transformation ratio, and uncontrolled SVTs with a constant ratio transformations. Both types are used to combat voltage dips [5].

Constant power supply of responsible consumers from their own low-power generating stations is also considered as a protection of electrical installations from voltage dips and interruptions [20], the advantages and disadvantages of such a solution are obvious. The local power system formed in this way is completely isolated from the effects of the external network and this completely eliminates the problem of voltage dips. This solution, however, requires serious justification, since it requires the installation of a complex of equipment near the enterprise, requires qualified maintenance [4].

Uninterruptible power supplies (UPS), such as batteries (AB) and backup diesel-generator devices (DGPs are a combination of a synchronous generator and a diesel engine), are also considered as means of combating long (more than 1 s) voltage dips. The installation of devices allows, when the voltage drops to the limit value, to switch to backup power with subsequent connection to the network when the voltage is restored. During voltage interruptions, they support the power supply of consumers for several hours until they run out of fuel or charge. Battery packs are usually used for backup power supply of less powerful loads (for example, data centers) or for installation in places where the operation of a diesel engine is dangerous. UPSs provide power supply to consumers of powerful consumers or groups of consumers [8]. The disadvantage of using UPSs is the need to constantly maintain them in the ready-to-start mode, which consumes electricity (for example,

to maintain the temperature regime of the electrical installation). Instant switching to backup power is also impossible.

There are also a number of electricity storage devices capable of quickly releasing stored energy to maintain voltage at a normal level during voltage dips, including: supercapacitors, which store energy in an electric field; superconducting inductors, which store energy in a magnetic field; and flywheels, which store mechanical rotational energy [8]. These types of storage devices are connected to the distribution network busbars and release the energy stored in them during voltage dips.

In the event of a voltage interruption or a long (about 1 second) voltage drop, when switching to power from a UPS (often supercapacitors and superconducting inductors are considered in tandem with an AB [12]), such storage devices, complete with converters, can maintain power supply to consumers during switching.

It is also worth noting another function of such installations. Superconducting inductors and supercapacitors, connected to the AC network through power converters (power electronics devices) and transformers, form dynamic voltage distortion compensators (DVCs). When registering a voltage drop, the DVCs form the currents of the primary winding of the transformer in such a way that the voltage on the secondary winding fully compensates for it.

DCSN devices operating according to the described principle may not contain an electricity storage device at all, but use network energy to add voltage to the common connection point; in this case, they operate according to the VDT principle with an adjustable transformation coefficient, and the possibility of compensation is determined by the residual network voltage.

A static reactive power compensator can act as a DCS device, if such a device is available at the common load connection point. When the voltage drops, it can maintain the voltage on the load if the inverter has a current reserve, switching to the reactive power compensation mode. The dynamics of the device based on a static compensator are extremely high, which allows it to compensate for a voltage drop

in about 5 ms, but this mode of operation requires special device control and availability of converter current reserve [8-9].

Flywheels, which are synchronous electric motors with an inertial mass fixed on the shaft, do not require additional converters and are connected to the network directly, operating in the recovery mode during a voltage drop. A flywheel-DGU connection is often used, in which the flywheel smooths out voltage drops lasting at least 10 ms [10]. When a voltage drop is registered, the responsible group of consumers is disconnected from the network and connected to a synchronous generator on the shaft of which the flywheel is unwound, and a signal is simultaneously given to start the engine. If the power supply is not restored within a second, the synchronous generator is connected to a diesel engine. The disadvantage of flywheels is high losses, since 99.9% of the operating time, the installation consumes electricity to compensate for friction and maintain the speed of rotation of the inertial mass.

Analysis of known methods of combating voltage dips in industrial networks has shown that there are a large number of ways to reduce the impact of voltage dips on the operation of electrical equipment in the electrical network. The considered methods vary from choosing a network topology that minimizes the impact of voltage dips on sensitive consumers of electricity to installing special devices that maintain the voltage at the load connection point at a given level. Common to the considered methods is the need for costs for installing additional equipment, which can be a good reason to abandon their use.

1.6 Methods of overcoming voltage dips using electric drives

In this section, we will consider a group of methods for overcoming voltage dips by the electric drive's own means. Unlike the methods considered in the previous section, the methods considered here are aimed at overcoming voltage dips by the drive of an electrical installation, interruptions in the operation of which are dangerous for people or can cause significant economic losses, using an automatic control system or relay protection and automation devices.

The most widespread strategy for controlling the electric drive during voltage dips is the following. until it stops. It should be noted that the operation of the automation can lead to a series of short-term voltage dips caused by the starting currents of the motors [9], while the number of consecutive dips will be equal to the number of relay operations.

As a solution to the problem of ensuring the operability of the electric drive during voltage dips, it is proposed to introduce an active rectifier (AR) into the drive, which maintains the LPS voltage at the task level. In particular, the use of an active voltage rectifier is considered, for normal operation of which it is necessary to maintain the LPS voltage above the amplitude of the line voltage [3]. In addition, active rectifiers maintain the input currents sinusoidal, which significantly reduces the impact of the electric drive on the quality of electricity.

To maintain voltage stability in the LPS during a voltage drop, a device from the boost converter family can be used . converters) [5-7]. The converter is included in the gap between the rectifier and the inverter. The automatic control system, with sufficient source power, maintains the output voltage of the converter at the target level and eliminates the influence of input voltage fluctuations on it. The application can be effective if the increased current consumption does not lead to an increase in the voltage drop in the network and a decrease in the voltage at the rectifier input. The constant operation of converters of this type reduces the efficiency of the DC link due to additional losses in the chokes and switches that are part of the converter. In this regard, it is proposed to use converter only during voltage dips [10]. The same class of methods for overcoming voltage dips by means of an electric drive includes the use of inverters with a special structure of the DC link. (e.g. Z-inverter) [7].

In addition to supplementing the DC link, it is proposed to use additional electricity storage devices [12] installed in parallel with the LPS capacitor. ABs, supercapacitors , and superconducting inductors are considered as storage devices, and they support the operation of the electric drive during voltage dips and interruptions.

In [7], the operation of a frequency- controlled asynchronous electric drive as a weakened field is considered. It was established that when the voltage in the DC link decreases, the control area of the electric drive narrows, limited by the maximum permissible inverter current and the ellipse, which determines the limits of stator current regulation by the magnitude of the LPS voltage. Since the major semi-axis of the ellipse is oriented towards the axis of *the q* -component of the stator current, and the constant torque curve is a hyperbola, when the voltage of the DC link decreases, the torque on the load can be maintained at the nominal level while reducing the value of *the d* -component of the stator current. Accordingly, both by weakening the rotor flux linkage and by increasing the value of the *q* -component of the stator current, it is possible to maintain the required electromagnetic torque while reducing the LPS voltage. This mode is called the weakened field mode.

In cases where the reduction of the LPS voltage makes it impossible to maintain the operating mode of the drive mechanism, it is necessary, if possible under the operating conditions of the installation, to reduce the power on the motor shaft, and, consequently, the power consumed by the electric drive. This is done by reducing the set speed of rotation. In the event that the movement is driven by a pump, compressor, fan or other mechanism, the resistance moment of which is proportional to the square of the rotation frequency, even a slight reduction in speed leads to a significant reduction in the power on the motor shaft. In this case, the energy outflow from the DC link is reduced and its voltage is stabilized, which allows you to successfully establish overcome voltage drop [4].

If the reduction of the LPS voltage does not allow switching to the weakened field mode, and the operating conditions of the drive mechanism do not allow reducing the power consumed by the drive, maintaining the operability of the drive mechanism is impossible. However, in this case, it is possible to reduce the start-up time of the electric drive when power is restored, as well as reduce the starting currents. For this, it is recommended to support the engine coasting while maintaining its controllability [9]. In this case, a minimum current should be formed in the stator windings, and energy losses should be reduced, and if possible, the

recovery of kinetic energy stored in the rotating parts of the mechanism should be ensured. These measures will minimize electricity consumption and preserve the charge in the LPS for re-starting.

Of all the described methods of overcoming voltage dips, those that do not require the installation of additional equipment at the level of the electrical network or at the level of a separate electric drive are of greatest interest. The group of methods that allow fully or partially to preserve the operability of the drive mechanism in conditions of voltage dips by the electric drive's own forces includes reducing the power of the drive unit, switching to recuperation mode, and switching the engine to a weakened field mode. However, in order to transfer the electric drive to any of the listed operating modes, it is necessary to know the dynamics of the change in the voltage of the DC link during a voltage dip, which requires data on the type and depth of the voltage.

Also relevant is the solution of the problem of maintaining the LPS voltage using an active rectifier. The AV control system, however, requires adjustments in asymmetric modes, which account for 80% of voltage dips [8]. The adjustment of the AVN task is carried out taking into account known data on the network voltage, so we will consider further known methods for determining the parameters of voltage dips.

1.7 Methods for recording voltage dips

As shown in the previous section, the electric drive is able to overcome short-term voltage dips on its own, but for this it is necessary to determine its beginning and depth in a timely manner (before the LPS voltage drops below the tap-changer setting, which is usually from 1 to 2 supply voltage periods [7]). Therefore, the question of choosing a method for determining the beginning of a voltage dip, as well as its parameters, is important.

The usual solution to this problem is to register voltage dips or a decrease in the effective voltage value in one of the phases. The effective value or root mean square value of the voltage over a period is determined by the formula:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}, \quad (1.2)$$

where $u(t)$ is a function describing the change in the instantaneous value voltage.

When analyzing real data obtained from digital meters, one moves from the integral to the sum [9]. In this case, averaging is performed on a data array corresponding to the duration of the voltage period. IEC in standard No. 61000-4-30 recommends updating a certain effective voltage value over a full period based on data for half of the voltage period, so it takes from 10 ms to determine the voltage dip in the described way.

To predict and determine the depth of voltage dips, a method was proposed based on the analysis of the topology of the distribution network and determining the depth of the voltage dip based on data on the length of the power transmission line and the calculated short-circuit currents. Any distribution network has a corresponding table in which it is indicated whether the voltage decreases or does not exist at some point in the network when voltage occurs. In this case, the effective voltage value is called, if maintained at some point in the network, the electrical equipment connected to this point maintains its operability. The method requires updating the tabular data when changing the network configuration, for example, in the case of automatic input of the reserve, the calculations may contain an error if the parameters of the power transmission lines are not determined accurately.

The Fourier transform is used to represent a function of time as a function of frequency, which is what frequency analysis is based on. Both digital and analog [5], but it has some disadvantages.

To overcome this limitation, an improved method based on the classical transform is used, called the short-time Fourier transform (short-time Fourier transform) . time Fourier transformation). To perform this transformation, the analyzed data array is divided into separate fragments. The signal is considered to be stable during each of the obtained time segments, which allows applying a fast

Fourier transform to each of them. To achieve good resolution, the signal spectrum is analyzed using various window functions [6].

Kalman filter is also used to identify voltage dips [4]. The discrete algorithm uses a mathematical signal model based on the assumption that the phase voltage at each time point is defined as a linear combination of the harmonic component vector and the voltage measurement error vector .

$$z_k[n] = H_k[n]U_k[n] + err_k[n] = \begin{bmatrix} \sin(\omega n \Delta t) \\ \cos(\omega n \Delta t) \\ \dots \\ \sin(m\omega n \Delta t) \\ \cos(m\omega n \Delta t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U_{11} \\ U_{21} \\ \dots \\ U_{1m} \\ U_{2m} \end{bmatrix} + err_k[n], \quad (1.3)$$

where z_k is the Kalman matrix , H_k – matrix of harmonic components, U_k – matrix of harmonic amplitudes , err_k is the error matrix, n – iteration number, m – harmonic order.

The essence of the algorithm is to iteratively change the amplitudes of the harmonic components until the error vector reaches zero values.

It is worth noting that the calculation of voltage parameters using the Kalman filter requires a small amount of initial data, which makes it effective for determining voltage dips. It is shown that the speed of determining the actual voltage value proposed method is less than 5 ms [5].

For very fast (up to 2 ms) determination of the presence and depth of voltage dip in each phase, a method based on dividing the signal into separate frequency ranges (low-frequency components and high-frequency components) is used. This is achieved by convolution over some basis function or mother wavelet (Wavelet) of the function $\psi (t)$ [6, 7]. Let there be some time function $x(t)$ then the wavelet transform $WT(a, \tau)$ of this function is determined by the expression:

$$WT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{\epsilon} \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1.4)$$

where a is the shift parameter, or the shift step is not zero, b is a constant, is chosen so that a and b represent an orthonormal basis.

It has also been established that the square root of the energy of the signal spectrum in the frequency window on which the wavelet transform ε takes place, normalized by some energy E_{norms} corresponding to some effective voltage value U_{norms} , has almost one hundred percent correlation with the effective voltage value U normalized by the same value U_{norms} :

$$\frac{U}{U_{норм}} \approx \sqrt{\frac{\varepsilon_g}{E_{норм}}}, \quad (1.5)$$

which allows you to determine the effective value of the voltage at a known energy density of the spectrum obtained by wavelet transformation [5].

The disadvantages of the considered method include the fact that the calculation must be performed for each phase separately, which reduces the speed of calculations or leads to an increase in computing power.

There are known numerical methods for determining the type of voltage dip, as well as the parameters of the forward and reverse sequence voltage of a three-phase network based on the analysis of the hodograph of the generalized network voltage vector [3, 5, 8]. The methods allow, based on three or more values of the voltages of three phases, to determine the parameters of the hodograph of the generalized vector, which are directly related to the values of the forward and reverse sequence of the network voltage. Among them, it is necessary to highlight the method for determining the parameters of the hodograph of the generalized voltage vector, since it is inferior in speed to wavelet algorithms and calculates three network voltages simultaneously. The disadvantage of the method is its inability to determine the zero sequence component, therefore the method is able to determine only linear voltages.

Analysis of existing methods for identifying voltage dips showed that the methods proposed in the literature allow for accurate determination of voltage drops in milliseconds, which allows them to be used to register a voltage dip and determine its depth to the discharge of the storage device in the DC link in order to select an electric drive control strategy that allows overcoming the voltage dip while maintaining the drive mode.

When choosing a method for determining voltage dips, the accuracy of determining its parameters and the speed of the method were taken into account, the most important parameters in the context of the problem. Of the methods considered in the section, these qualities combine wavelet analysis and a method for determining the components of the forward and reverse voltage sequences by the parameters of the hodograph of the generalized network voltage vector .

Conclusions for Chapter 1

1. The problem of voltage dips remains relevant, despite the large number of works devoted to its solution. From the given examples of the impact of this phenomenon on technological equipment and the given statistics, it is clear that voltage dips can cause an emergency stop of a frequency -controlled electric drive with a capacity of tens and hundreds of kilowatts to tens of megawatts, if their duration exceeds 50 milliseconds , and the depth exceeds 0%. According to the statistics presented in the section, 80% of voltage dips that occur in operating power systems fall under these conditions.

2. Analysis of means and methods of combating voltage dips showed that there are a number of ways to overcome voltage dips using the electric drive's own means while maintaining the operating mode of the drive mechanism (using an active rectifier as part of the electric drive, operating the drive in a weakened field mode), while supporting the operation of the electric drive and reducing power consumption and switching the engine to the mode.

3. Methods of overcoming voltage dips using the electric drive's own means are appropriate because they do not require the use of additional equipment in either the power supply system or the electric drive system.

4. The application of the described methods requires the fastest possible registration of voltage dips and determination of its parameters. Analysis of known methods of registering voltage dips showed that the method based on determining the parameters of the hodograph of the generalized network voltage vector is the most convenient for determining the values of the supply voltage during their instantaneous change.

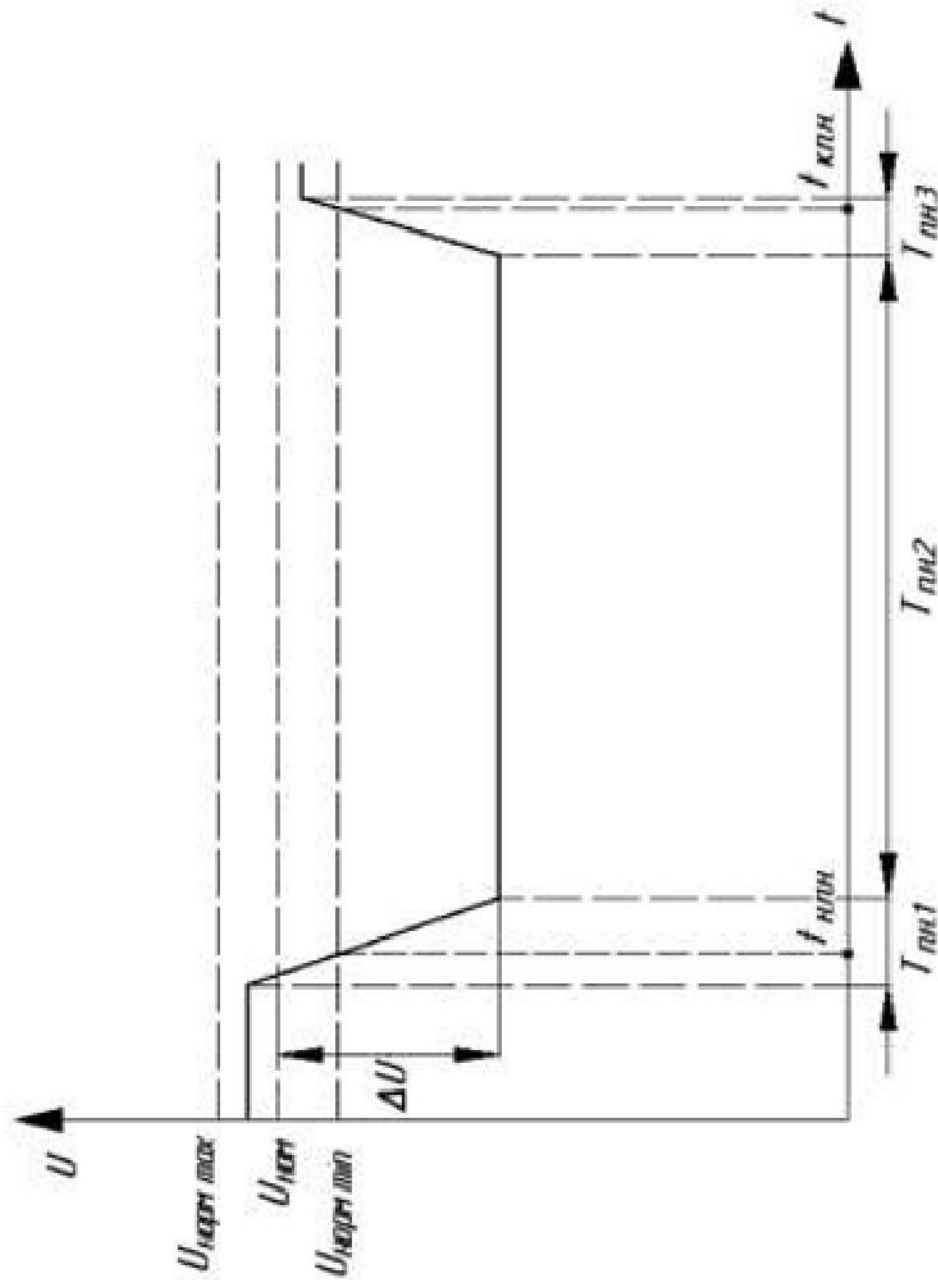
Актуальність теми.

Для забезпечення безперервної роботи частотно-регульованого електроприводу при провалах напруги актуальним є завдання максимально швидкого визначення величини напруги живлення і передбачення динаміки зміни напруги ланки постійного струму у разі некерованого випрямляча, або коригування системи управління з урахуванням отриманих про напругу живлення даних у разі активного випрямляча.

Мета роботи.

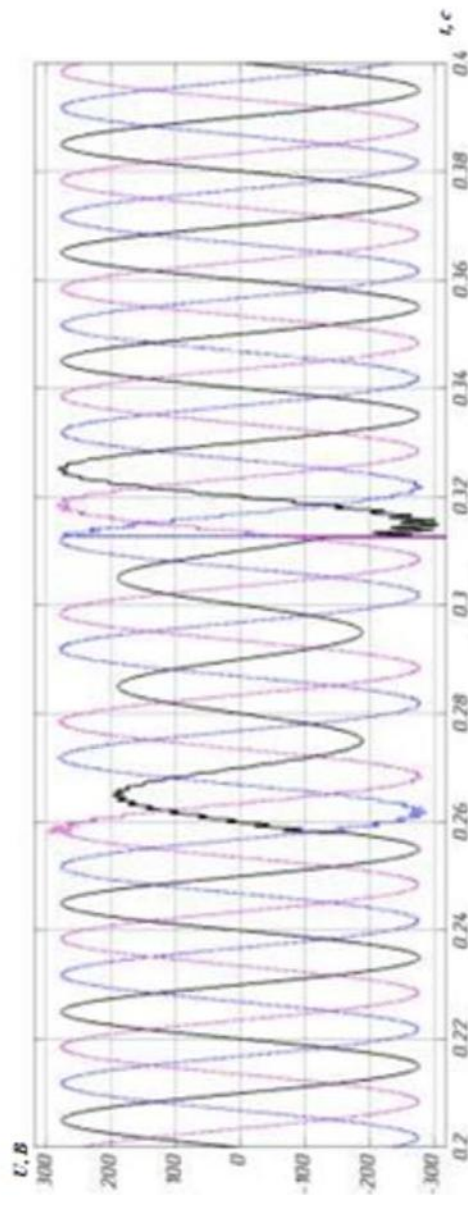
Підвищення ефективності роботи електротехнічного комплексу частотно-регульованого електроприводу шляхом обґрунтованого вибору алгоритмів керування приводом у режимі провалу напруги.

Динаміка зміни чинного значення напруги в одній із 1 фаз трифазної мережі при провалі напруги

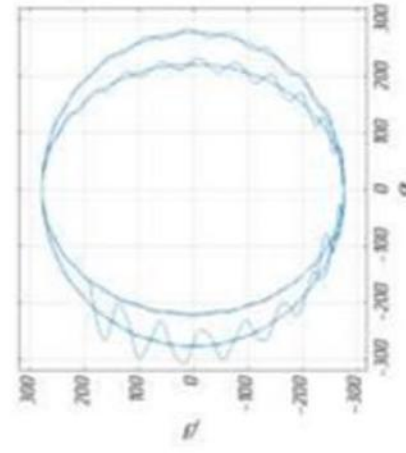


Однофазний провал напруги (а), годограф узагальненого вектора напруги (б), зміна площі секторів узагальненого вектора напруги (в)

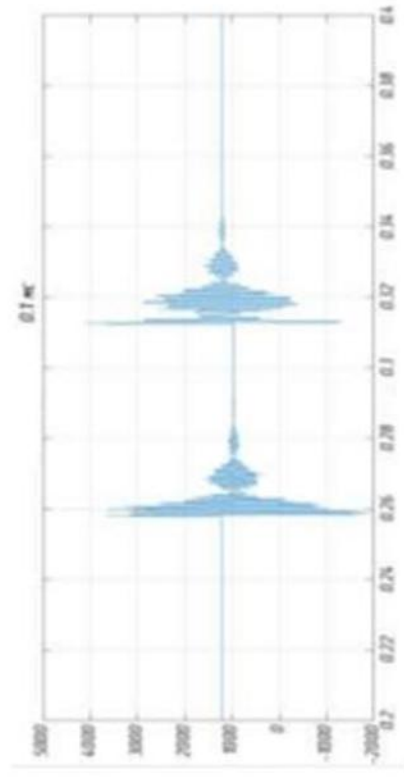
3



(а)



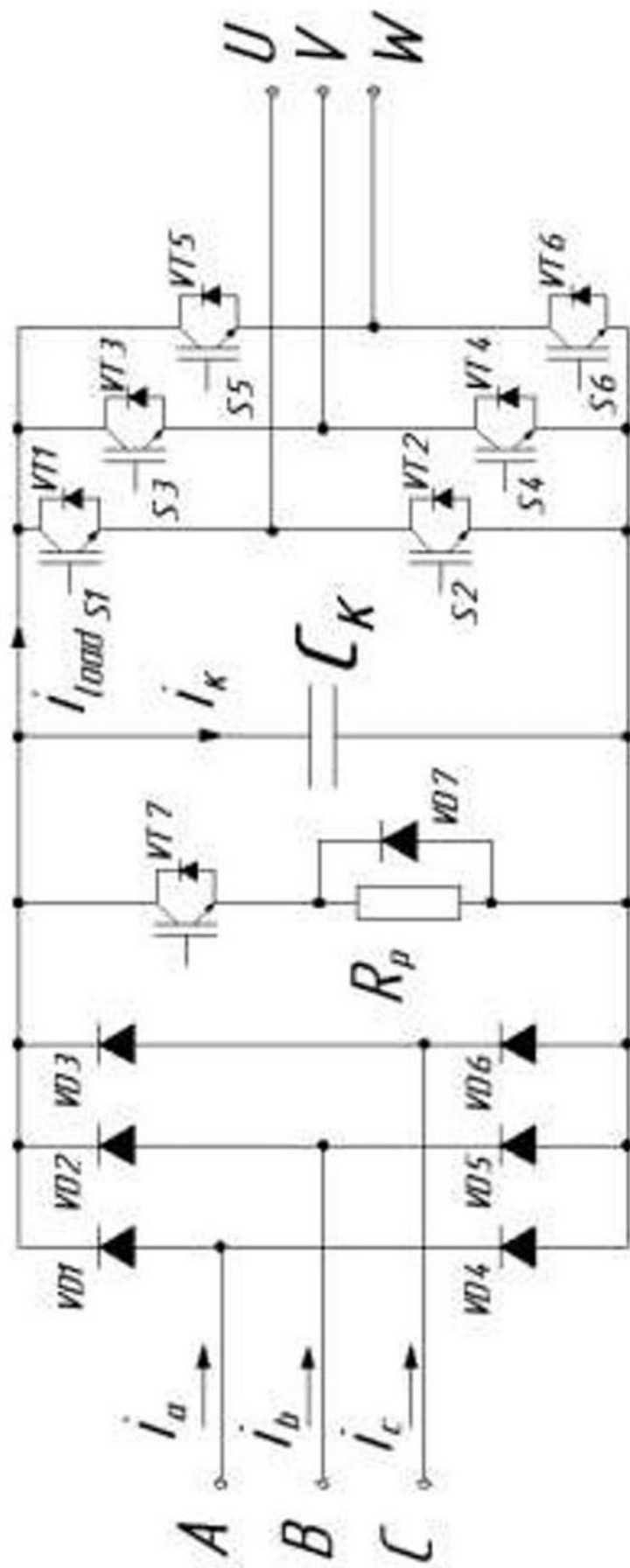
(б)



(в)

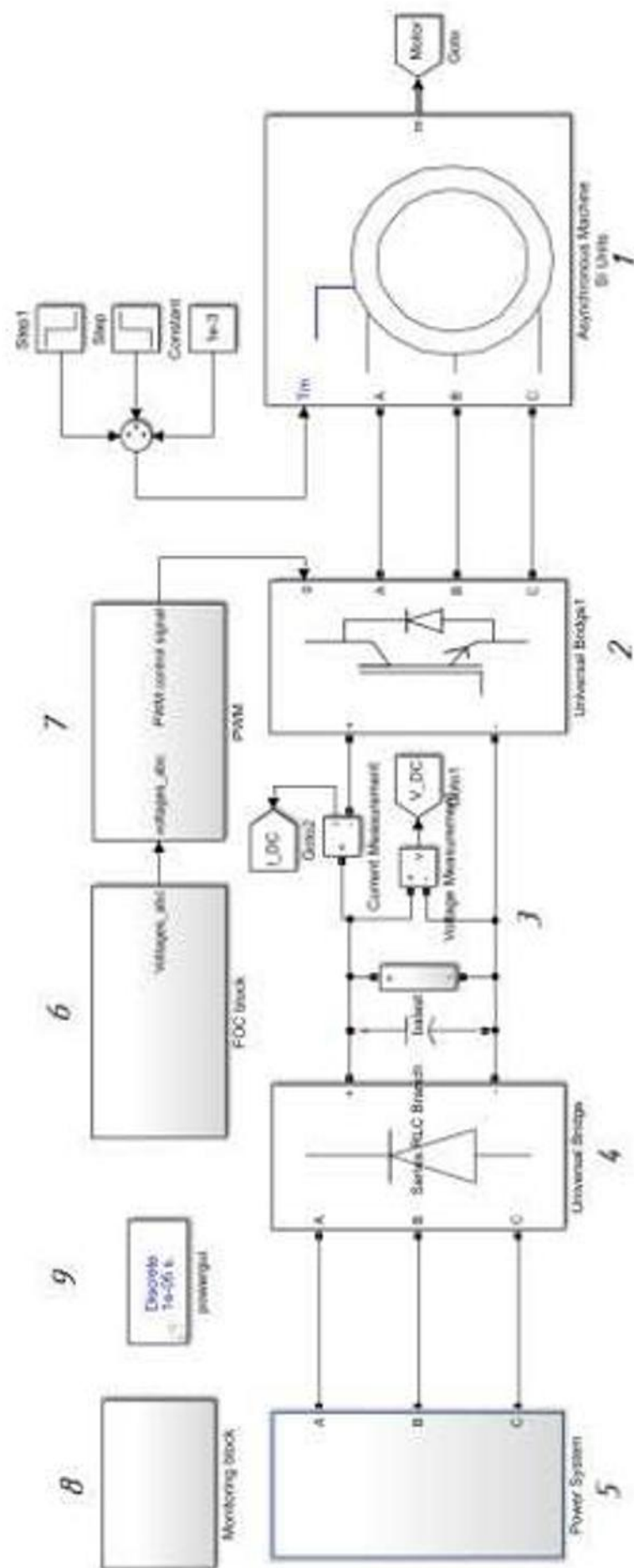


Структура перетворювача частоти з пасивним
шестипульсним випрямлячем та інвертором напруги

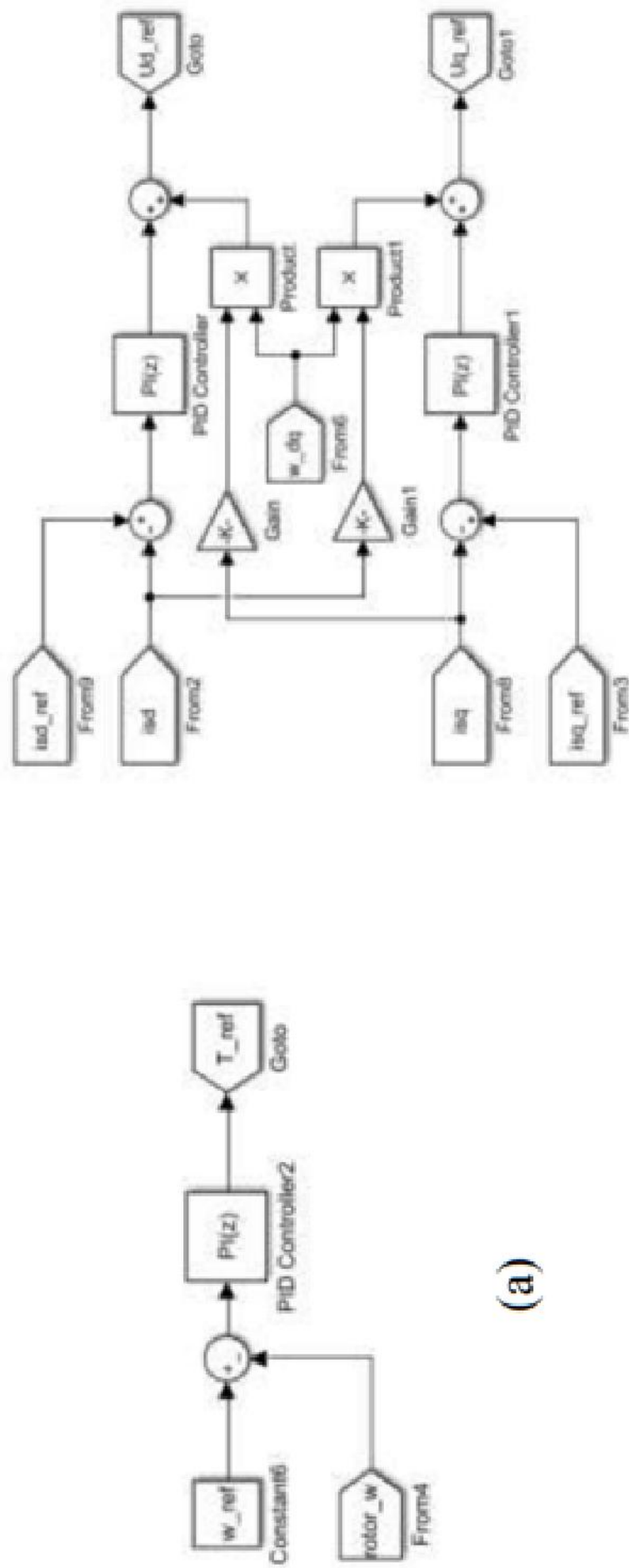


Структура моделі асинхронного електроприводу з векторним керуванням

5



Контури регулювання швидкості (а) та струму (б)

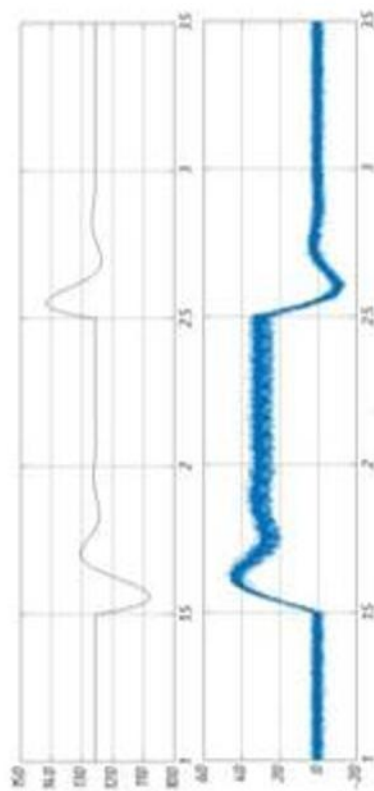


(б)

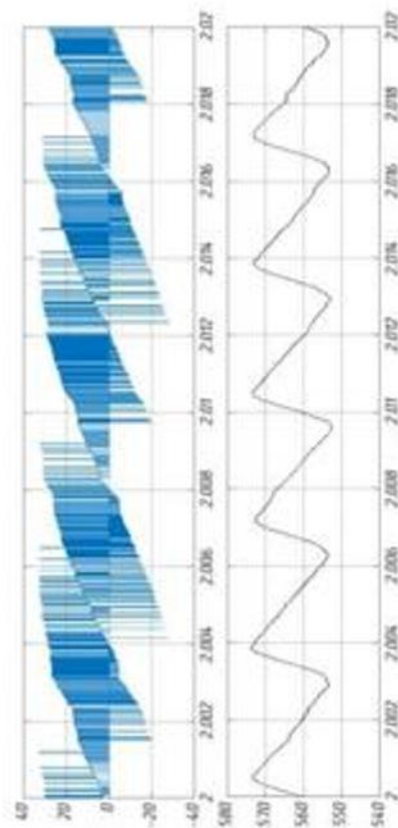
(а)

Зміна механічних параметрів приводу

7



Струм та напруга ЛПС приводу під навантаженням при нормальній напрузі



Струм і напруга ЛПС приводу під навантаженням під час провалу напруги

