

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська політехніка»

Бойко Андрій Олександрович

**ПИТАННЯ СТІЙКОСТІ ТА СПЕЦІАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ
АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТПН**

Монографія

Одеса
2024

УДК 62-83:621.313

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного університету «Одеська політехніка» Міністерства освіти і науки України (протокол № 14 від 25.06.2024 р.).

Рецензенти:

Муха М.І., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та електроніки Національного університету «Одеська морська академія»

Нікульшин В.Р., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики Національного університету «Одеська політехніка»

Климчук О.А., доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Бойко А.О. Питання стійкості та спеціальні режими роботи асинхронного електроприводу з ТПН: монографія / А.О. Бойко. – Одеса: Національний ун-т «Одеська політехніка», 2024. – 138 с.

В монографії розглянуті методи математичного моделювання електроприводу ТПН-АД. Розглянуто зміст фізичних процесів при виникненні коливань у розімкнутій системі асинхронного електроприводу з ТПН. Запропоновано математичні методи дослідження стійкості. Здійснена оцінка впливу параметрів електроприводу та зовнішніх факторів на стійкість ТПН-АД. Виконано дослідження спеціальних режимів роботи асинхронного електроприводу з ТПН, зокрема режиму симетрування струмів та мінімізації втрат потужності. Проілюстровано роботу системи автоматичного симетрування струмів статора двигуна та визначені показники її роботи. Проведено дослідження режимів роботи електроприводу ТПН-АД, оптимальних за критерієм мінімуму втрат. Запропонована система автоматичної мінімізації втрат потужності з одночасними функціями симетрування струмів двигуна при живленні електроприводу від джерела з несиметричною напругою. Розроблено алгоритм керування ТПН-АД та ілюстровано шляхи підвищення ефективності мінімізації втрат та симетрування за рахунок застосування мікропроцесорних засобів керування.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ РОЗРОБОК І ПЕРСПЕКТИВ	
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТПН–АД.....	7
1.1. Загальна характеристика та область застосування.....	7
1.2. Схеми силової частини	9
1.3. Системи керування та способи синхронізації тиристорів.....	10
1.4. Статичні та динамічні режими роботи.....	14
1.5. Спеціальні режими роботи.....	16
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО	
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТПН.....	21
2.1. Завдання при моделюванні та методи їх вирішення.....	21
2.2. Методи моделювання асинхронних двигунів.....	23
2.2.1. Загальні питання моделювання асинхронних машин в фазних координатах.....	23
2.2.2. Особливості моделювання асинхронних двигунів в трифазних лінійних величинах.....	28
2.2.3. Моделювання асинхронних двигунів з урахуванням роботи ТПН....	30
2.3. Особливості урахування нелінійності параметрів асинхронних двигунів.....	32
2.4. Методи розв'язання диференціальних рівнянь.....	34
2.5. Математичний опис тиристорних перетворювачів напруги.....	36
2.6. Модель джерела живлення	39
2.7. Алгоритм моделі електроприводу ТПН-АД.....	40
РОЗДІЛ 3. СТІЙКОСТЬ РОЗІМКНУТОЇ СИСТЕМИ АСИНХРОННОГО	
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТПН.....	44
3.1. Природа виникнення коливань, види та особливості коливальних процесів.....	44

3.2. Методи дослідження стійкості та визначення коливань.....	47
3.2.1. Динамічні властивості асинхронних двигунів.....	47
3.2.2. Розробка та застосування математичного методу дослідження стійкості.....	55
3.3. Оцінка впливу на стійкість параметрів електроприводу.....	59
3.4. Обмеження коливальних процесів.....	62
РОЗДІЛ 4. НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ ТА АЛГОРИТМИ СИМЕТРУВАННЯ ТПН-АД.....	
4.1. Математичний опис трифазних несиметричних систем.....	64
4.2. Методологія дослідження несиметричних режимів роботи	66
4.3. Результати дослідження несиметричних режимів роботи.....	73
4.4. Симетрування струмів статора асинхронного двигуна.....	79
4.4.1 Схеми та математичний опис системи автоматичного симетрування..	79
4.4.2. Результати симетрування та їх аналіз	85
РОЗДІЛ 5. МІНІМІЗАЦІЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В АД.....	
5.1. Обґрунтування можливості та умов зменшення втрат потужності в АД	93
5.2. Синтез системи мінімізації втрат потужності.....	98
5.3. Аналіз результатів мінімізації втрат потужності.....	104
РОЗДІЛ 6. МІНІМІЗАЦІЯ ВТРАТ В АД ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ДЖЕРЕЛА З НЕСИМЕТРИЧНОЮ НАПРУГОЮ.....	
6.1. Особливості режиму мінімізації втрат в умовах несиметричного живлення	108
6.2. Питання апаратної реалізації системи мінімізації втрат потужності та синтез алгоритму її роботи.....	115
6.3. Електромеханічна система мінімізації втрат, як джерело вищих гармонік	121
ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	131

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- АД – асинхронний двигун;
- БГА – блок гармонійного аналізу струмів;
- БКР – блок корекції;
- БП – блок перетворення;
- БФНН – блок формування несиметричної напруги;
- ВГ – вищі гармоніки;
- ДД – датчик кута δ ;
- ДС – датчик струму;
- ДЖ – джерело живлення;
- ЕЛП – елемент пам'яті;
- ЕОДС – елемент обчислення діючого струму;
- ЕП – електропривод.
- ЗЗ – зворотний зв'язок;
- КЗ – режим короткого замикання асинхронного двигуна;
- КЗЗА (КЗЗВ, КЗЗС) – канал зворотного зв'язку фази А, В і С;
- ККА (ККВ, ККС) – канал керування фазою А, В і С;
- ПЕМУ – початкові електромагнітні умови;
- РД – регулятор кута δ ;
- РС – регулятор струму;
- САС – система автоматичного симетрування струмів АД ;
- СІФК – система імпульсно-фазового керування;
- СМП – система мінімізації втрат потужності в АД;
- СН – синхронізація вентилів ТПН з напругою мережі;
- СС – синхронізація вентилів ТПН зі струмом навантаження;
- ТПН – тиристорний перетворювач напруги;
- ФЗ – формувач завдання;
- ХХ – режим холостого ходу асинхронного двигуна.

ВСТУП

В теперішній час у світовій практиці продовжує спостерігатися тенденція, виражена у збільшенні масового виробництва і використання регульованих електроприводів (ЕП) змінного струму. Відомо, що в розвинених країнах від 70% до 80%, від загальної кількості споживаної електроприводом електроенергії, припадає на ЕП з асинхронними двигунами (АД), причому переважно з короткозамкненим ротором [1]. Це зумовлено їх відносно невисокою вартістю, меншою, порівняно з електричними двигунами інших типів, потребою в дефіцитних матеріалах, економічністю, простотою і надійністю.

Стосовно асинхронних двигунів широко використовують два класи ЕП – це електроприводи з тиристорними перетворювачами напруги (ТПН) і перетворювачами частоти. Використання тієї чи іншої системи диктується техніко-економічними вимогами механізмів до ЕП, насамперед, необхідністю тривалої роботи на швидкості нижче номінальної [2].

Асинхронні електроприводи з ТПН вирізняються низькою вартістю, простотою, хорошими масогабаритними показниками, високою надійністю, мають (особливо під час використання в замкнених системах) широкі функціональні можливості. Аналіз можливостей ТПН-АД показує, що він, характеризуючись меншими вартісними показниками, може успішно конкурувати з частотно-регульованими електроприводами у всіх випадках, де не потрібні значні діапазони зміни швидкості [3].

Історія розвитку електроприводу ТПН-АД налічує більше п'ятдесяти років, втім, і сьогодні не можна говорити про те, що всі науково-технічні проблеми вирішено, а його резерви технічного вдосконалення вичерпано. Так, недостатньо розроблено теоретичні питання, пов'язані з динамікою розімкнених систем ТПН-АД з урахуванням різних принципів синхронізації вентилів. Перспективним є розв'язання задачі синтезу замкнених енергоощадних електромеханічних систем, зокрема тих, що працюють в умовах негативних показників якості джерела живлення.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СТАНУ РОЗРОБОК І ПЕРСПЕКТИВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТПН-АД

1.1. Загальна характеристика та область застосування

Виробники електротехнічного обладнання випускають комплектні пристрої керування асинхронними двигунами з тиристорними перетворювачами напруги під різними назвами: “Softstarter”, “Пристрій плавного пуску”, “Електропривод ТПН-АД”, “Асинхронний електропривод з ТПН”, “Електронний пускач”, “Безконтактний пускач”, “Пусковий регулятор напруги” (рис. 1). Потужність цих пристроїв становить від одиниць до сотень кіловат і зазвичай відповідає всьому відрізку потужностей національних серій асинхронних двигунів. Ці пристрої, завдяки фазовому параметричному управлінню напругою, можуть забезпечувати плавний пуск з вибором параметра і часу регулювання, а також режим енергозбереження за неповного навантаження або холостого ходу АД [4].

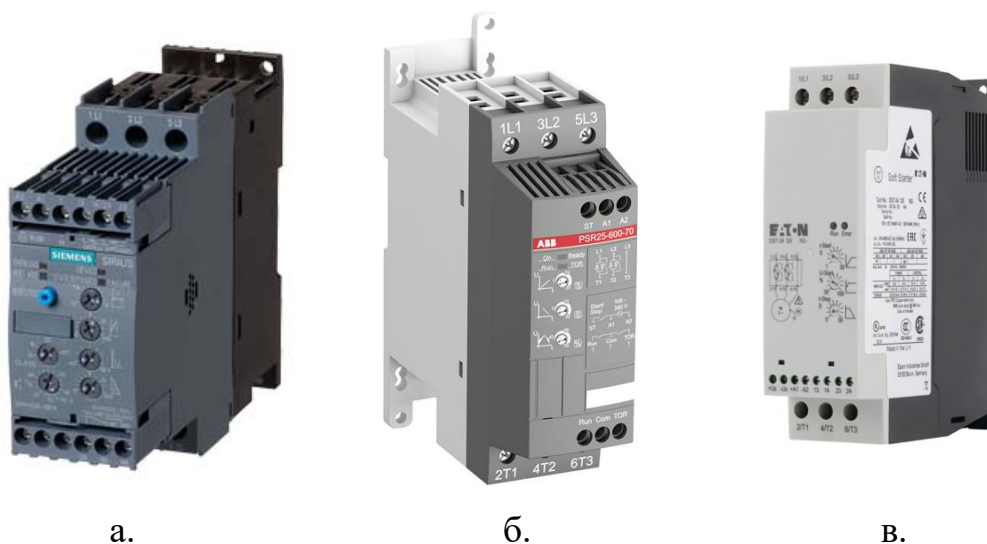


Рис. 1. Загальний вигляд пристроїв плавного пуску виробників: а – Siemens, б – ABB, в – Eaton.

До основних переваг асинхронних ЕП з ТПН можна віднести [4]:

- простоту схемної реалізації та надійність;
- порівняно невисоку вартість перетворювача;
- високий коефіцієнт корисної дії ТПН (до 0,97 - 0,98);
- можливість обмеження пускових струмів АД;
- можливість формування спеціальних режимів роботи (зменшення втрат потужності в АД, функції симетрування тощо).

Відомі й недоліки ЕП:

- неможливість тривалої роботи АД зі ковзаннями, вищими за номінальне, за рахунок істотних втрат у роторі;
- неможливість регулювання напруги вгору від номінальної;
- додаткові втрати, що виникають від несинусоїдальності вихідної напруги ТПН;
- наявність нестійких режимів роботи розімкнених систем ЕП.

Переваги та недоліки визначають сфери застосування. Так, для низки промислових механізмів, досконаліші системи регульованого електроприводу мають підвищену вартість, але виявляються надлишковими за технічними можливостями. Порівняння техніко-економічних показників у кожному конкретному випадку дає змогу визначити раціональні сфери застосування асинхронних електроприводів із тиристорними перетворювачами напруги. Це насамперед механізми безперервної та циклічної дії, які не потребують регулювання швидкості, але потребують забезпечення показників якості перехідних процесів. До таких механізмів належать широкі класи вентиляторів і насосних установок, підйомно-транспортні механізми [5]. Перспективним є застосування пристроїв плавного пуску для нерегульованих за швидкістю АД, які працюють у переміжному номінальному режимі S_6 , коли відбувається чергування роботи під навантаженням і на холостому ході (в області малих навантажень). У цьому разі використання ТПН диктується ще й можливістю зменшення втрат в АД потужності та будь-якою економією електроенергії.

1.2. Схеми силової частини

Силова частина комплектного асинхронного тиристорного електроприводу складається з тиристорного перетворювача, що дає змогу здійснювати фазове параметричне регулювання вихідної напруги, і асинхронного двигуна. До складу тиристорного перетворювача входять силові тиристири, що виконують комутаційні функції, система імпульсно-фазового керування (СІФК), блоки керування, контролю і захистів [4].

Широко застосовуються асинхронні двигуни нормального або загальнопромислового застосування. Використовуються як асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, так і з фазним ротором. Застосування перших вважається пріоритетним, що пояснюється більш простою конструкцією і надійністю під час експлуатації [6]. Надалі, при згадці АД розумітимемо асинхронний двигун із короткозамкненим ротором.

У деяких випадках, особливо коли необхідне отримання знижених швидкостей у розімкненій системі, або потрібна тривала робота зі ковзанням, більшим за номінальне, застосовують двигуни спеціального виконання: з підвищеним опором ротора, збільшеним повітряним зазором, зі спеціальною конструкцією ротора. Під час проектування спеціальних асинхронних двигунів одночасно вживають заходів до зменшення впливу вищих гармонік на формовані режими, до підвищення вібростійкості конструкцій обмоток і механічних частин АД.

Тиристорні перетворювачі вмикаються в ланцюг змінного струму, як правило, між джерелом живлення й обмоткою статора АД, з'єднаною в переважній більшості випадків у "зірку" [5]. Різноманітність структур силових кіл перетворювачів, призначених для регулювання напруги на статорі АД, характеризується модифікаціями, які відрізняються розташуванням, кількістю і типом застосовуваних вентилів. Застосування відповідної структури залежить від виду приводного механізму, потужності АД, заданих режимів роботи електроприводу.

На рис. 1.1 представлено деякі з основних схем силових кіл ТПН. Незважаючи на практичне застосування основних схем, найбільшого поширення набули показані на рис. 1.1,б і рис.1.1,г схеми із симетричним керуванням, коли в усі фази статора АД включені комутаційні елементи, які складаються з двох зустрічно-паралельних тиристорів.

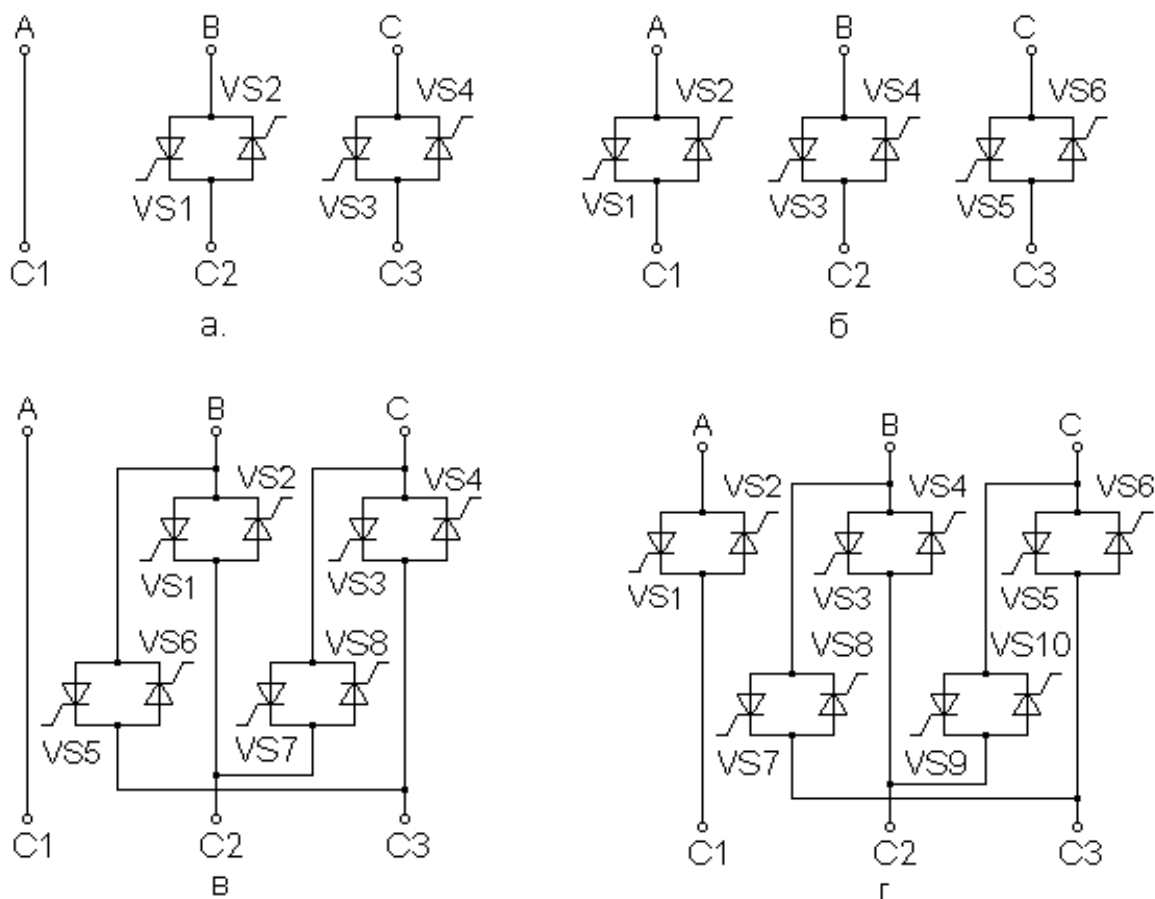


Рис 1.2. Схеми силових кіл ТПН

1.3. Системи керування і способи синхронізації тиристорів

Вимоги до систем імпульсно-фазового керування ТПН можна охарактеризувати так: СІФК повинна забезпечувати [4]:

- проходження імпульсів, що відмикають на керуючі електроди тиристорів, з частотою напруги джерела живлення;
- чітке увімкнення вентилів у domeжовому та надмежовому режимах;

- необхідний діапазон зміни кута відкриття тиристорів під час роботи АД на регульовальних характеристиках;
- симетрію кутів увімкнення за фазами.

Зазвичай застосовують СІФК вертикального типу, що містять три основні вузли – блок синхронізації, фазозсувний пристрій і формувачі імпульсів струму керування тиристорів. Блок синхронізації і фазозсувний пристрій забезпечують керування кутом відмикання.

Формувачі імпульсів забезпечують надійне вмикання тиристорів у задані моменти часу. Основним елементом блоку синхронізації є генератор пилкоподібної напруги, синхронізований з напругою мережі. Значення пилкоподібної напруги, що надходить з виходу генератора, порівнюють із напругою керування і в момент їх рівності, за допомогою вихідного каскаду, формують сигнал, який подається на керуючий електрод тиристора. Цей спосіб керування має назву тиристорного фазового керування [5]. Зміна напруги керування від нуля до максимуму відповідає зміні кута керування (кута увімкнення тиристорів) α від максимального до мінімального значення. За цього способу відлік кута керування тиристорів проводиться відносно нульового значення синусоїди живильної фазної напруги. Цей спосіб синхронізації є класичним і має визначення синхронізації з напругою мережі (СН).

Діапазон зміни кута керування α залежить від необхідного діапазону регулювання вихідної напруги ТПН. Асинхронний двигун є специфічним активно-індуктивним навантаженням, фазовий кут навантаження залежить від ковзання і для АД загальнопромислового призначення змінюється в діапазоні від $\varphi_{кз} \approx 25 - 30$ ел. град. під час пуску до значення в режимі холостого ходу $\varphi_{хх} \approx 87 - 90$ ел. град. Оскільки регулювання вихідної напруги перетворювача принципово можливе за умови $\alpha \geq \varphi$, то мінімальне значення кута керування α_{\min} визначається мінімальною фазою струму навантаження й обмежується можливостями схеми синхронізації. Максимальне значення α_{\max} для симетричних схем із шістьма тиристорами зазвичай відповідає роботі перетворювача в обмеженому режимі та не потребує більше 90 - 100 ел. град [4].

У разі необхідності отримання великого діапазону вихідних напруг максимальний кут керування збільшується до 120 - 150 ел. град. Необхідний робочий діапазон регулювання лежить усередині цих меж і залежить від параметрів АД і режиму, в якому це регулювання проводиться. Змінна фаза струму статора зумовлює особливості формування і форми керівних імпульсів. На рис. 1.3.а наведено часову діаграму, що пояснює принцип формування імпульсів керування. Якщо кут керування α менший за кут запізнювання струму (додаткової провідності тиристорів) – δ , виникають передумови до процесів зривів комутації. Для недопущення цього застосовують або широкі імпульси, або інтервал π - α заповнюють імпульсами, кожен з яких має параметри, достатні для відкриття тиристорів [7].

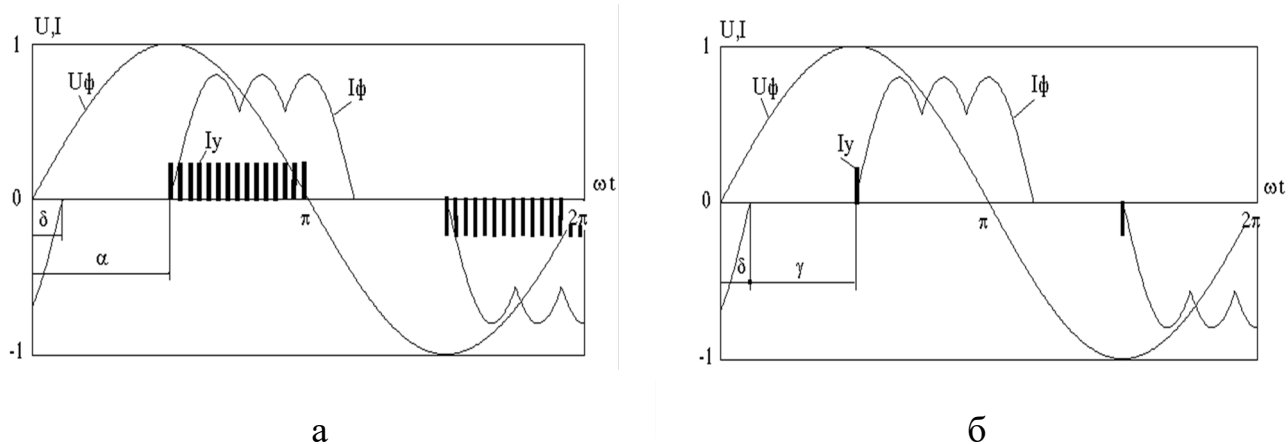


Рис. 1.3. Часові діаграми струмів, напруг і синхроімпульсів при синхронізації: а – з напругою мережі; б – зі струмом навантаження

Крім способу синхронізації з напругою мережі в технічній практиці відомий інший спосіб, що має назву синхронізації зі струмом навантаження (СС) [8]. У блоках синхронізації СІФК, побудованих на цьому принципі, сигнал керування тиристорами синхронізується з закінченням струму статора АД у останньому напівперіоді, перед поданням керуючого сигналу. Замість сигналу, який керує величиною кута α , використовують керування тривалістю безструмової паузи γ (рис. 2.1.б). У разі збігу величини напруги керування з напругою "пили" у

вихідному каскаді формується імпульс струму керування тиристором I_{γ} . Зв'язок між кутами керування за двома розглянутими способами синхронізації α (СН) і γ (СС) здійснюється через кут запізнювання закінчення струму δ за допомогою виразів $\alpha = \delta + \gamma$ або $\gamma = \alpha - \delta$. Відповідно до цього, у системі з СС режим $\gamma = 0$ означає рівність $\alpha = \delta$ за будь-якого значення кута навантаження φ , а випадок $\alpha < \delta$ принципово не має місця. Отже, на тиристори подається одиночний короткий імпульс керування, з певною шириною. Межі діапазону регулювання кута безструмової паузи γ не залежать від кута навантаження φ і тому за будь-якого його значення $\gamma_{\min} = 0$, а $\gamma_{\max} = \alpha_{\max} - \delta$. Діапазон зміни кута безструмової паузи менший, ніж кута керування, і становить $0 \leq \gamma \leq 60$ ел. град. Максимальні та мінімальні обмеження γ_{\min} и γ_{\max} в СІФК з СС не потрібні [9].

Детальне вивчення і порівняння властивостей ТПН з різними принципами синхронізацією проводилися в Одеському політехнічному інституті (Національний університет "Одеська політехніка") у 1970 – 2000-х роках [8,9]. Ці дослідження довели переваги синхронізації зі струмом навантаження:

- у системах ТПН-АД із СС повністю відсутня зона нечутливості, властива системам з СН у режимах роботи, коли $\alpha \leq \varphi$;
- вплив кута навантаження на вихідну напругу ТПН у системах з синхронізацією зі струмом навантаження значно менший;
- формування статичних моментів навантаження у розімкнених системах ТПН-АД з СС протікає за сприятливіших умов, порівняно з СН;
- штучні механічні характеристики асинхронного двигуна в ЕП з СС, порівняно з СН, мають підвищену жорсткість робочої ділянки, а критичне ковзання залежить від кута керування і зменшується з його збільшенням;
- за умовами постійного значення кута регулювання, вихідна напруга ТПН з СН має позитивну залежність від кута φ навантаження, а з СС – негативну. Ця властивість здійснює стабілізуючу дію в динамічних режимах розімкнених систем ЕП.

1.4. Статичні та динамічні режими роботи

Основною вимогою під час формування механічних характеристик АД є реалізація режиму, що встановився в певному діапазоні зміни моменту. На механічні характеристики, за умовами фазового параметричного керування, накладаються обмеження з боку ТПН у вигляді неможливості отримання напруги, більшої, ніж напруга джерела живлення ЕП. У загальному випадку, для забезпечення роботи реверсивного електроприводу статичні механічні характеристики повинні розташовуватися в чотирьох квадрантах. Крім рухового режиму, можливе формування всіх відомих видів гальмівних режимів – рекуперативного гальмування, динамічного гальмування і противовключення [6].

Реверс АД здійснюється шляхом подавання керуючих імпульсів на певну групу вентилів ТПН, обраних логічним перемикальним пристроєм. Для керування реверсивним тиристорним ЕП достатньо сформувати релейний сигнал на виході логічного перемикального пристрою на вибір групи тиристорів і сигнал СІФК для визначення кута їх відкриття.

Питання формування динамічних процесів в АД мають особливий інтерес, тому що обертальний момент під час увімкнення АД – коливальна величина у функції часу. Некеровані перехідні процеси асинхронних двигунів, особливо АДК, супроводжуються великими, у багато разів більшими за номінальний, електромагнітними моментами та струмами. Це негативно впливає на конструкцію двигуна, механічну передачу, приводний механізм і джерело живлення. Аналіз способів формування моменту АД у перехідних процесах за допомогою ТПН дає змогу виокремити два найпоширеніші:

- створення початкового магнітного потоку при детермінованому підключенні фаз двигуна до джерела живлення;
- зміна величини і швидкості наростання напруги, прикладеної до двигуна в перехідних режимах.

У разі детермінованого ввімкнення двигуна пропонується певна черговість під'єднання обмоток статора до джерела живлення або синхронізоване з джерелом живлення перемикання тиристорних груп ТПН під час переведення двигуна з режиму в режим, що дає змогу компенсувати вільну складову поточкозчеплень і зменшити амплітуду коливань моменту в перехідних процесах.

Другий спосіб заснований на програмній зміні в процесі запуску АД кута відмикання тиристорів від деякого максимального значення α_{\max} до величини $\alpha = \varphi$ [5]. Визначальним при цьому є час загасання. Останніми роками як пристрої, що формують темп наростання напруги на двигуні, використовують ТПН із керуючим мікроконтролером. Напруга на двигуні при використанні таких пристроїв підвищується плавно, починаючи з нуля, причому темпи підвищення напруги підтримуються на заданому рівні відповідно до обраного закону.

Особливістю роботи пристроїв плавного пуску є, в ряді випадків, наявність нестійких режимів роботи. Нестійкість проявляється у виникненні періодичних коливань швидкості, моменту і струмів. Коливання розглядаються як негативне явище, яке суттєво перешкоджає нормальній роботі електромеханічних систем [10, 11].

Значне розширення функціональних можливостей асинхронних електроприводів з ТПН можливе при застосуванні замкнутих систем автоматичного керування (САК), які забезпечують необхідні значення показників якості в динаміці – тривалості перехідного процесу, перерегулювання, коливання вихідних величин, необхідних обмежень величин, динамічних помилок тощо. Для забезпечення необхідної якості замкнутих САК в перехідних режимах і режимах, що встановилися, необхідно мати у своєму розпорядженні обґрунтовані методи аналізу таких систем, що ґрунтуються на вивченні динамічних властивостей елементів, що входять до САУ, і насамперед АД як об'єкта керування.

Для забезпечення роботи АД у сталому режимі за постійних значень швидкості можуть використовуватися замкнуті системи керування, що реалізують функції підтримки швидкості. Незважаючи на простоту реалізації та

налаштування регуляторів, застосування цих систем обмежується режимом з переміжним навантаженням S_6 або S_8 при нетривалому зниженні швидкості. У разі необхідності тривалої роботи АД зі зниженою швидкістю, Softstarter з фазовим керуванням поступається ЕП із частотним керуванням, а за вимог до підвищеної швидкості АД виявляється непрацездатним.

Перспективним є застосування ТПН-АД з системою автоматичного позиціонування. За відповідних налаштувань регуляторів, ЕП з подібними САК має порівняно високу швидкодію в пуско-гальмівних режимах і точність позиціонування, достатню для більшості загальнопромислових механізмів [4].

1.5. Спеціальні режими роботи

1.5.1. Мінімізація втрат потужності в АД і поліпшення енергетичних показників. У зв'язку з високою вартістю енергоносіїв, економія електроенергії засобами ЕП була і буде актуальним завданням. Як і питання синтезу та практичного застосування багатофункціональних автоматичних систем ТПН-АД, що дають змогу здійснювати оптимальне регулювання напруги залежно від навантаження, з подальшим зменшенням втрат в асинхронному двигуні [2,5]. Подібні режими роботи асинхронного електроприводу з ТПН можна охарактеризувати як спеціальні.

Існує широкий ряд промислових механізмів, номінальний режим роботи яких можна охарактеризувати як повторно-короткочасний (S_3). Усереднене навантаження АД за потужністю в різних галузях промисловості невелике і в деяких із них не перевищує 0,1 - 0,5 від номінального [6]. Водночас основні серії асинхронних двигунів проектуються з найвищим коефіцієнтом корисної дії (ККД) виходячи з роботи з навантаженням 0,7 - 0,8 від номінального. Це призводить до зниження основних енергетичних показників АД - ККД і коефіцієнта потужності. Застосування спеціальних типів двигунів і заходів щодо обмеження роботи АД у сфері малих моментів навантаження повністю проблему не вирішують.

Очевидно, що під час роботи вхолосту або з недовантаженням у двигуні необхідно збуджувати менший магнітний потік, що відповідає поточному значенню навантаження. Це дає змогу виконувати ТПН-АД із параметричним керуванням у складі замкнутих електромеханічних систем. У цьому полягає один із принципів мінімізації втрат потужності та поліпшення енергетичних показників АД [3]. Під час пошуку критеріїв оптимізації енергетичних показників і способів їхньої технічної реалізації, найперспективнішими для застосування є критерії мінімуму втрат потужності та сталості коефіцієнта потужності. За кожним із критеріїв розраховується деяке ковзання, що визначається як оптимальне, підтримуючи яке можна забезпечувати екстремум заданого критерію. Звідси впливає і спосіб реалізації за будь-яким із критеріїв – шляхом стабілізації необхідного ковзання. Перспективною є розробка і застосування систем стабілізації коефіцієнта потужності або кута запізнювання закінчення струму, що дають результати, близькі до способу підтримки постійного ковзання. Пропонуються також системи екстремального регулювання, засновані на пошуку мінімуму або максимуму заданого критерію [12]. Застосування оптимального керування дає змогу істотно знизити сумарні втрати потужності в АД за змінного навантаження, що забезпечує значний ефект з економії споживаної електроенергії. Максимальний ефект зменшення втрат потужності досягається в режимах неповного навантаження і холостого ходу АД. У багатьох літературних джерелах вказується, що зазначений режим можливий за моментів навантаження АД від 0,5 - 0,6 M_n і менше, хоча це і справедливо не для всіх двигунів. Під час оцінки економії енергетичних ресурсів слід враховувати, що вона досягається як за рахунок скорочення сумарних втрат потужності, так і за рахунок збільшення коефіцієнта потужності АД. У двигунів з високими енергетичними показниками відносні цифри економії набагато менші, ніж у двигунів з низькими значеннями номінальних коефіцієнтів корисної дії та коефіцієнтів потужності [13].

1.5.2. Симетрування струмів АД. Несиметричні режими роботи трифазних асинхронних двигунів можуть виникати: при живленні від джерела з

несиметричною напругою, за умови несиметрії опорів у колах статора та ротора, за рахунок фазної несиметрії увімкнення тиристорів ТПН. Усі види несиметрії слід розглядати окремо. Так, несиметрія власних параметрів АД практично не піддається корекції в умовах експлуатації, а, єдине розв'язання проблеми полягає в компенсації її негативних наслідків засобами електроприводу. Допустима несиметрія кутів увімкнення тиристорів ТПН становить 1,5 ел. град. для схеми з шістьма тиристорами та приблизно 3 ел. град. для схеми з трьома тиристорами та трьома діодами, менш чутливої до несиметрії. Для виключення асиметрії керівних імпульсів, зумовленої відмінністю характеристик каналів керування, застосовують одноканальні синхронні СІФК з одним загальним для всіх фаз фазозсувним пристроєм. Несиметрія напруги в електричних мережах виникає під час роботи потужних однофазних навантажень, або трифазних, які працюють тривалий час у несиметричних режимах, зокрема й в аварійних. Коефіцієнт несиметрії K_u , що визначає величину несиметрії напруги джерела живлення, нормується. Значення $K_u < 2\%$ тривало допустимо на затискачах будь-якого трифазного споживача. Гранично-допустиме значення коефіцієнта становить $K_u < 4\%$ [14]. На практиці ці величини не завжди відповідають стандартам і можуть значно перевищувати їх. В табл. 1.1 приведені характерні значення коефіцієнтів несиметрії напруги для різних галузей промисловості України.

Таблиця 1.1

Показники несиметрії напруги

<i>Галузь промисловості</i>	<i>K_u, %</i>
Чорна металургія	1,2 - 8
Кольорова металургія	2,1 - 8
Целюлозно-паперова промисловість	0 - 4,3
Гірничодобувна промисловість	0,2 - 5

Усі несиметричні режими роботи чинять негативний вплив на АД [6]. За несиметрії напруги в електричних машинах виникають магнітні поля, що обертаються з синхронною швидкістю не тільки в напрямку обертання ротора, але в протилежному напрямку. У результаті виникають гальмівний електромагнітний момент і коливальна складова електромагнітного моменту з

частотою коливання сто герц. Виникає додаткове нагрівання активних частин АД, насамперед статора за рахунок перевищення фазних струмів номінального значення. За характеру несиметрії напруги з одночасним її зниженням навантаження по фазах обмоток розподіляється нерівномірно, що призводить до перегрівання обмоток навіть за моментів навантаження, істотно менших за номінальний.

В АД за коефіцієнтів несиметрії, що перевищують нормативні значення, зниження обертового моменту виявляється нехтувано малим. Вплив несиметрії на втрати в електродвигуні, нагрівання і скорочення терміну служби його ізоляції проявляються більшою мірою. Так, під час роботи двигуна з номінальним моментом навантаження і при живленні від джерела з несиметричною напругою, що характеризується $K_u = 4\%$, термін служби ізоляції АД скорочується приблизно вдвічі тільки за рахунок додаткового нагріву [14]. При цьому, якщо напруга на одній із фаз значно перевищує номінальну, скорочення терміну служби ізоляції буде ще більшим. Для забезпечення нормальних умов роботи АД при живленні від джерела з несиметричною напругою необхідно завищувати номінальну потужність, передбачати спеціальні заходи щодо симетрування напруги ДЖ, або проводити симетрування струмів АД засобами ЕП. У замкнутій системі асинхронного ЕП з ТПН існує можливість досить простими засобами ефективно пригнічувати асиметрію його вихідних координат [15]. Основні принципи створення подібних систем полягають у введенні в ТПН штучної асиметрії за кутами ввімкнення тиристорів з метою симетрування струмів статора АД. Актуальним питанням є розробка критеріїв управління і технічної реалізації подібних систем симетрування (САС).

Критерієм застосування САС є робота в умовах суттєвої несиметрії ($K_u > 4 - 8\%$). Якщо несиметрія напруги ДЖ не настільки істотна або виникає короткочасно, застосування систем автоматичного симетрування найчастіше не виправдане, оскільки вони виявляються фактично марними при відновленні показників якості напруги ДЖ. Перспективним і актуальним є завдання з розроблення багатофункціональних електромеханічних систем, що

забезпечували б зменшення енергоспоживання АД за нормальних умов роботи, а в разі виникнення несиметрії джерела живлення давали змогу поєднати функції мінімізації втрат потужності в АД та симетрування [16].

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТПН

2.1. Завдання при моделюванні та методи їх вирішення

Метод математичного моделювання є найбільш поширеним методом дослідження асинхронних електроприводів з вентильними перетворювачами. Завдяки високій точності та практично необмеженим можливостям щодо врахування нелінійностей будь-якого характеру, дослідження, проведені за допомогою математичної моделі, нерідко називають експериментом на моделі. Математична модель, отримана з урахуванням припущень та ідеалізації, являє собою систему диференціальних, алгебраїчних і логічних рівнянь, що відображають умови електричної та механічної рівноваги і умови електромеханічного перетворення енергії. Рівняння електричної рівноваги складаються за законами Кірхгофа і рівняннями Максвелла, а механічної – за рівняннями Д’Аламбера або Лагранжа. Для моделювання симетричних режимів АД із короткозамкненим ротором, залежно від поставлених завдань дослідження, доцільно застосовувати ортогональні системи координат. Для моделювання асинхронного електроприводу з ТПН і для моделювання АД у несиметричних режимах застосовується трифазна нерухома система координат. При цьому струми, розраховані по осях, відповідають фазним струмам і використовуються для контролю комутації вентилів [17].

Як змінні стану обираються потокозчеплення статора і ротора, які визначаються на кожному кроці чисельного інтегрування. Після цього вирішується система алгебраїчних рівнянь для визначення струмів. У разі неповнофазних режимів, коли, як це має місце в електроприводі ТПН-АД, чергуються інтервали трифазної провідності вентилів із різними варіантами двофазної, опис здійснюється в лінійних величинах.

Для адекватності моделі під час розрахунків обов'язково необхідно враховувати низку нелінійностей АД. До відомих видів нелінійності належать ефекти витіснення струму і насичення машини, втрати в сталі, зміна робочої температури тощо. Для врахування більшості категорій нелінійностей необхідно мати отримані експериментально або розрахунковим шляхом функціональні залежності невідомих величин. Вибір враховуваної нелінійності параметра, а також методики врахування індивідуальні і визначаються складністю завдань, які ставляться перед моделлю.

Використання ТПН з фазовим способом регулювання призводить до значних спотворень форми напруги, що подається на обмотки статора АД. Існують два підходи моделювання АД щодо несинусоїдального живлення, які принципово відрізняються. Перший ґрунтується на розкладанні реальної форми напруги на гармонійні складові та поданні двигуна у вигляді багатостаторної та багатороторної машини, кожен комплект статора та ротора якої живиться певною гармонікою напруги та має відповідні цій гармоніці параметри. Результируючий момент визначається як сума окремих складових з урахуванням фази і напрямку обертання окремих гармонік. За другого підходу вважають, що АД має один комплект обмоток, на який подається напруга реальної несинусоїдальної форми. Для розв'язання задач дослідження електроприводу найчастіше використовують другий підхід.

Під час моделювання перетворювача з природною комутацією вентилів опис його роботи зводиться до кількох логічних функцій, що відображають фазування окремих вентилів і напрямок протікання струму в них. Комутаційні властивості тиристорів – час увімкнення і вимкнення, падіння напруги на відкритому вентилі і внутрішній опір закритого вентиля в електричних колах промислової частоти близькі до ідеальних. Це дає змогу під час моделювання ТПН застосовувати поняття ідеального ключа, тобто комутувального елемента, у якого в відкритому стані опір і падіння напруги наближаються до нуля, а в закритому стані опір прямує до нескінченності. Прийняття моделі ідеального ключа спрощує структуру моделі та вибір кроку інтегрування [18].

2.2. Методи моделювання асинхронних двигунів

2.2.1. Загальні питання моделювання асинхронних машин у фазних координатах. Усі відомі електричні машини, зокрема і асинхронна короткозамкнена, можуть бути описані на підставі принципів узагальненої машини. Під узагальненою машиною розуміють ідеалізовану неявнополіусну машину з симетричними зосередженими трифазними обмотками на статорі та роторі [19].

Найпростіше математичний опис асинхронної машини може бути виконано у двофазних ортогональних координатах. Відомі ортогональні координати: в осях, що обертаються, – з довільною швидкістю – $u, v, 0$, з синхронною швидкістю – $x, y, 0$, зі швидкістю ротора – $d, q, 0$ і нерухомі щодо статора – $a, b, 0$. Застосування тієї чи іншої моделі визначається метою і завданнями дослідження. Опис будь-якої з них ґрунтується на заміні реальної трифазної машини еквівалентною двофазною моделлю та є досить добре висвітленим у літературі [17,19].

Моделювання АД у природних трифазних осях А, В, С нерухомої системи координат більш складне у виконанні, проте має низку корисних якостей, невласливих моделюванню у двофазних координатах. Під час опису осі трифазних координат поєднують із магнітними осями обмоток фаз реальної асинхронної машини. Природність опису і універсальність є важливими позитивними властивостями цієї моделі. В осях А,В,С можливо виконати моделювання роботи АД при живленні від несиметричного джерела напруги, низку аварійних режимів АД, а також описати системи вентильного керування на основі логічних алгоритмів комутації вентилів.

З огляду на те, що реальний асинхронний двигун є комплексом тривимірних електричних і магнітних ланцюгів, які містять різні нелінійності, неможливо абсолютно точно описати його за допомогою рівнянь Максвелла. Під час моделювання найбільш прийнятними є такі припущення:

- симетричність обмоток статора;
- симетричність обмоток ротора;
- синусоїдальний розподіл магнітних полів уздовж кола;
- рівномірність повітряного зазору;
- взаємна незалежність насичення на шляхах розсіювання і на шляху основного магнітного потоку.

Повнота врахування нелінійностей параметрів АД визначається вимогами до точності дослідження й обов'язково передбачає врахування тих, що найбільше впливають на робочі характеристики машини. З урахуванням зазначених припущень і поставлених у роботі завдань достатньо враховувати ефекти насичення сталі машини та витіснення струму [20]. Вихідні диференціальні рівняння електричної рівноваги у фазних координатах А,В,С для кіл статора мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} u_{1A} &= r_1 i_{1A} + \dot{\psi}_{1A}, \\ u_{1B} &= r_1 i_{1B} + \dot{\psi}_{1B}, \\ u_{1C} &= r_1 i_{1C} + \dot{\psi}_{1C}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Рівняння ротора АД

$$\left. \begin{aligned} 0 &= r_2 i_{2A} + \dot{\psi}_{2A} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2B} - \psi_{2C}), \\ 0 &= r_2 i_{2B} + \dot{\psi}_{2B} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2C} - \psi_{2A}), \\ 0 &= r_2 i_{2C} + \dot{\psi}_{2C} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2A} - \psi_{2B}), \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

де $\omega_2 = \omega_p p$ – електрична кутова швидкість ротора, рад/с;

p – число пар полюсів АД, в.о.

Система рівнянь поточозчеплень статора і ротора асинхронної машини має вигляд

$$\left. \begin{aligned} \psi_{1A} &= L_1 i_{1A} + M_1 (i_{1B} + i_{1C}) + M_0 (i_{2A} - 0,5i_{2B} - 0,5i_{2C}), \\ \psi_{1B} &= L_1 i_{1B} + M_1 (i_{1A} + i_{1C}) + M_0 (-0,5i_{2A} + i_{2B} - 0,5i_{2C}), \\ \psi_{1C} &= L_1 i_{1C} + M_1 (i_{1A} + i_{1B}) + M_0 (-0,5i_{2A} - 0,5i_{2B} + i_{2C}), \\ \psi_{2A} &= L_2 i_{2A} + M_2 (i_{2B} + i_{2C}) + M_0 (i_{1A} - 0,5i_{1B} - 0,5i_{1C}), \\ \psi_{2B} &= L_2 i_{2B} + M_2 (i_{2C} + i_{2A}) + M_0 (-0,5i_{1A} + i_{1B} - 0,5i_{1C}), \\ \psi_{2C} &= L_2 i_{2C} + M_2 (i_{2A} + i_{2B}) + M_0 (-0,5i_{1A} - 0,5i_{1B} + i_{1C}), \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

де L_1, L_2 – коефіцієнти самоіндукції обмоток статора і ротора, Гн;

M_1, M_2 – коефіцієнти взаємоіндукції обмоток статора одна з одною (M_1) і обмоток ротора одна з одною (M_2), Гн;

M_0 – коефіцієнт взаємоіндукції обмоток статора і ротора АД одна з одною, Гн.

Різнойменні обмотки статора і ротора зрушені в просторі на кут $\frac{2\pi}{3}$.

Коефіцієнти взаємоіндукції, подібних обмоток рівні $M_0 \cos(\pm \frac{2}{3}\pi)$.

Коефіцієнти самоіндукції визначаються з параметрів Т-образної схеми заміщення асинхронної машини за виразами [4],

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{x_1 + x_0}{\omega_0} = \frac{2}{3} \cdot \frac{x_s}{\omega_0}, \\ L_2 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{x_2 + x_0}{\omega_0} = \frac{2}{3} \cdot \frac{x_r}{\omega_0}. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

де x_1, x_2, x_0 – індуктивні опори статора, ротора та контуру намагнічування, відповідно, Ом;

ω_0 – електрична кутова швидкість поля, рад/с.

Коефіцієнти взаємоіндукції знаходяться

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= -0,5L_1, \\ M_2 &= -0,5L_2, \\ M_0 &= \frac{2}{3} \cdot \frac{x_0}{\omega_0}, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Динаміка асинхронної машини визначається залежністю електромагнітного моменту, одна з форм запису якої має вигляд

$$M_{EM} = \frac{\sqrt{3} \cdot p}{2} [(\Psi_{2B} - \Psi_{2C})i_{2A} - \Psi_{2A}(i_{2B} - i_{2C})]. \quad (2.6)$$

Рівняння механічної рівноваги в динаміці записується [2]

$$\dot{\omega}_p = \frac{1}{J_\Sigma} p (M_{EM} - M_C), \quad (2.7)$$

де J_Σ – сумарний момент інерції ЕП, кг·м²;

M_C – статичний момент навантаження, Н·м.

Розв'язання рівнянь електричної рівноваги може виконуватися одним з чисельних методів окремо для кожної фази асинхронної машини або у формі системи рівнянь. Для програмної реалізації математичної моделі зручно використовувати математичний апарат матриць [21]

$$\Psi = L \times i, \quad (2.8)$$

де Ψ – матриця-стовпець потокозчеплень статора й ротора;

i – матриця-стовпець струмів статора й ротора;

L – квадратна матриця коефіцієнтів індуктивному зв'язку.

Матриці складаються зі значень фазних величин

- потокозчеплень

$$\Psi^T = \|\Psi_{1A}, \Psi_{1B}, \Psi_{1C}, \Psi_{2A}, \Psi_{2B}, \Psi_{2C}\|, \quad (2.9)$$

- струмів

$$i^T = \|i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}, i_{2A}, i_{2B}, i_{2C}\|, \quad (2.10)$$

- коефіцієнтів індуктивного зв'язку

$$L = \left\| \begin{array}{cccccc} L_1 & M_1 & M_1 & M_0 & -0,5M_0 & -0,5M_0 \\ M_1 & L_1 & M_1 & -0,5M_0 & M_0 & -0,5M_0 \\ M_1 & M_1 & L_1 & -0,5M_0 & -0,5M_0 & M_0 \\ M_0 & -0,5M_0 & -0,5M_0 & L_2 & M_2 & M_2 \\ -0,5M_0 & M_0 & -0,5M_0 & M_2 & L_2 & M_2 \\ -0,5M_0 & -0,5M_0 & M_0 & M_2 & M_2 & L_2 \end{array} \right\| \quad (2.11)$$

У трифазній системі з ізольованою нейтраллю завжди сума фазних і лінійних величин напруг, струмів і потокозчеплень дорівнює нулю. Тому вихідні диференціальні рівняння електричної рівноваги у фазних координатах А, В, С для кіл статора та ротора мають тільки по дві незалежні змінні, а сама система рівнянь має надмірність. Розрахунок струмів статора і ротора за вихідними рівняннями потокозчеплень складний через високий порядок алгебраїчних рівнянь. Також під час використання прикладних програм розв'язання матричних рівнянь виникають умови, за яких головний визначник дорівнює нулю. Це призводить до ділення на нуль і неможливості безпосереднього розв'язання системи. Враховуючи, що

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1A} + \Psi_{1B} + \Psi_{1C} &= 0, \\ \Psi_{2A} + \Psi_{2B} + \Psi_{2C} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

рівняння електричної рівноваги статора і ротора (2.1) і (2.2) можуть бути записані у вигляді більш компактному й зручному для рішення

$$\left. \begin{aligned} u_{1A} &= r_1 i_{1A} + \dot{\Psi}_{1A}, \\ u_{1B} &= r_1 i_{1B} + \dot{\Psi}_{1B}, \\ 0 &= r_2 i_{2A} + \dot{\Psi}_{2A} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\Psi_{2B} - \Psi_{2C}), \\ 0 &= r_2 i_{2B} + \dot{\Psi}_{2B} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\Psi_{2C} - \Psi_{2A}). \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Після знаходження невідомих потокозчеплень Ψ_{1A} , Ψ_{1B} , Ψ_{2A} , Ψ_{2B} розраховуються невідомі потокозчеплення третьої фази

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1C} &= -(\Psi_{1A} + \Psi_{1B}), \\ \Psi_{2C} &= -(\Psi_{2A} + \Psi_{2B}). \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Після зниження порядку системи, аналогічно рівнянням рівноваги напруг шляхом виключення струмів i_{1C} і i_{2C} визначаються відповідні матриці

$$\Psi^T = \|\Psi_{1A}, \Psi_{1B}, \Psi_{2A}, \Psi_{2B}\|, \quad (2.15)$$

$$\mathbf{i}^T = \|i_{1A}, i_{1B}, i_{2A}, i_{2B}\|. \quad (2.16)$$

Матриця коефіцієнтів системи рівнянь

$$\mathbf{L} = \begin{vmatrix} 1,5L_1 & 0 & 1,5M_0 & 0 \\ 0 & 1,5L_1 & 0 & 1,5M_0 \\ 1,5M_0 & 0 & 1,5L_1 & 0 \\ 0 & 1,5M_0 & 0 & 1,5L_1 \end{vmatrix}. \quad (2.17)$$

Після розв'язку системи рівнянь (2.9) за знайденими струмами i_{1A} , i_{1B} , i_{2A} , i_{2B} знаходяться невідомі струми третьої фази

$$\left. \begin{aligned} i_{1C} &= -(i_{1A} + i_{1B}), \\ i_{2C} &= -(i_{2A} + i_{2B}). \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

2.2.2. Особливості моделювання асинхронних двигунів в трифазних лінійних величинах. При моделюванні асинхронного двигуна з тиристорним перетворювачем напруги існують режими, що характеризуються чергуванням двофазного та трифазного підключення обмоток статора до джерела живлення. У цьому випадку доцільно застосовувати трифазну модель двигуна в лінійних величинах. При цьому система фазних напруг живлення зберігається, але доповнюється системою лінійних [18].

Повна система диференціальних рівнянь статора в лінійних координатах має вигляд

$$\left. \begin{aligned} u_{1AB} &= +2r_1 i_{1AB} - r_1 i_{1BC} - r_1 i_{1CA} + \dot{\psi}_{1AB}, \\ u_{1BC} &= -r_1 i_{1AB} + 2r_1 i_{1BC} - r_1 i_{1CA} + \dot{\psi}_{1BC}, \\ u_{1CA} &= -r_1 i_{1AB} - r_1 i_{1BC} + 2r_1 i_{1CA} + \dot{\psi}_{1CA}. \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

Система рівнянь ротора

$$\left. \begin{aligned} 0 &= 2r_2 i_{2AB} - r_2 i_{2BC} - r_2 i_{2CA} + \dot{\psi}_{2AB} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2BC} - \psi_{2CA}), \\ 0 &= -r_2 i_{2AB} + 2r_2 i_{2BC} - r_2 i_{2CA} + \dot{\psi}_{2BC} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2CA} - \psi_{2AB}), \\ 0 &= -r_2 i_{2AB} - r_2 i_{2BC} + 2r_2 i_{2CA} + \dot{\psi}_{2CA} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2AB} - \psi_{2BC}). \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

При моделюванні лінійні напруги і потокозчеплення зберігаються, а перехід до фазних струмів здійснюється на підставі виразів

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_{AB} - i_{CA}, \\ i_B &= i_{BC} - i_{AB}, \\ i_C &= i_{CA} - i_{BC}. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

Рівняння балансу напруг статора в лінійних координатах мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} u_{1AB} &= r_1 i_{1A} - r_1 i_{1B} + \dot{\psi}_{1AB}, \\ u_{1BC} &= r_1 i_{1B} - r_1 i_{1C} + \dot{\psi}_{1BC}, \\ u_{1CA} &= -r_1 i_{1A} + r_1 i_{1C} + \dot{\psi}_{1CA}. \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

Рівняння напруг ротора

$$\left. \begin{aligned} 0 &= r_2 i_{2A} - r_2 i_{2B} + \dot{\psi}_{2AB} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2BC} - \psi_{2CA}), \\ 0 &= r_2 i_{2B} - r_2 i_{2C} + \dot{\psi}_{2BC} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2CA} - \psi_{2AB}), \\ 0 &= -r_2 i_{2A} + r_2 i_{2C} + \dot{\psi}_{2CA} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2AB} - \psi_{2BC}). \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Матриці лінійних поточкозчеплень, фазних струмів і коефіцієнтів індуктивного зв'язку в лінійних координатах записуються аналогічно виразам у фазних координатах [21]

$$\mathbf{L} = \left\| \begin{array}{cccccc} 1,5L_1 & -1,5L_1 & 0 & 1,5M_0 & -1,5M_0 & 0 \\ 0 & 1,5L_1 & -1,5L_1 & 0 & 1,5M_0 & -1,5M_0 \\ -1,5L_1 & 0 & 1,5L_1 & -1,5M_0 & 0 & 1,5M_0 \\ 1,5M_0 & -1,5M_0 & 0 & 1,5L_2 & -1,5L_2 & 0 \\ 0 & 1,5M_0 & -1,5M_0 & 0 & 1,5L_2 & -1,5L_2 \\ -1,5M_0 & 0 & 1,5M_0 & -1,5L_2 & 0 & 1,5L_2. \end{array} \right\| \quad (2.24)$$

Аналогічно, як і при представленні у фазних величинах, необхідно понизити порядок системи рівнянь за рахунок виключення змінних однієї з фаз

$$\left. \begin{aligned} u_{1AB} &= r_1 i_{1A} - r_1 i_{1B} + \dot{\psi}_{1AB}, \\ u_{1BC} &= r_1 i_{1B} - r_1 i_{1C} + \dot{\psi}_{1BC}, \\ 0 &= r_2 i_{2A} - r_2 i_{2B} + \dot{\psi}_{2AB} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2BC} - \psi_{2CA}), \\ 0 &= r_2 i_{2B} - r_2 i_{2C} + \dot{\psi}_{2BC} + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_2 (\psi_{2CA} - \psi_{2AB}). \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Після розрахунків двох невідомих потокозчеплень третє лінійне потокозчеплення визначається на підставі

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1CA} &= -(\Psi_{1AB} + \Psi_{1BC}), \\ \Psi_{2CA} &= -(\Psi_{2AB} + \Psi_{2BC}). \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Матриця-стовпець потокозчеплень здобуває вид

$$\Psi^T = \|\Psi_{1AB}, \Psi_{1BC}, \Psi_{2AB}, \Psi_{2BC}\|. \quad (2.27)$$

а матриця-стовпець струмів, при цьому, зберігає колишній вид (2.11).

Матриця коефіцієнтів індуктивного зв'язку

$$\mathbf{L} = \begin{vmatrix} 1,5L_1 & -1,5L_1 & 1,5M_0 & -1,5M_0 \\ 1,5L_1 & 3L_1 & 1,5M_0 & 3M_0 \\ 1,5M_0 & -1,5M_0 & 1,5L_2 & -1,5L_2 \\ 1,5M_0 & 3M_0 & 1,5L_2 & 3L_2 \end{vmatrix}. \quad (2.28)$$

Після розв'язання системи рівнянь $\Psi = \mathbf{L} \times \mathbf{i}$ за знайденими струмами i_{1A} , i_{1B} , i_{2A} , i_{2B} знаходяться струми статора і ротора третьої фази АД

$$\left. \begin{aligned} i_{1C} &= -(i_{1A} + i_{1B}), \\ i_{2C} &= -(i_{2A} + i_{2B}). \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

При аналізі несиметричних режимів застосовується вираз електромагнітного моменту, який враховує суму попарних добутків усіх струмів АД [22]

$$M_{EM} = \frac{x_0 \cdot p \cdot [(i_{1A} \cdot i_{2C} + i_{1B} \cdot i_{2A} + i_{1C} \cdot i_{2B}) - (i_{1A} \cdot i_{2B} + i_{1B} \cdot i_{2C} + i_{1C} \cdot i_{2A})]}{\sqrt{3} \cdot \omega_0}. \quad (2.30)$$

2.2.3. Моделювання асинхронних двигунів з урахуванням роботи ТПН. Тиристорне фазове керування АД обумовлює наявність двофазних режимів роботи, що наступають, коли струм в одній з фаз стане рівним нулю, за умови, що завдання по куту включення відповідного вентиля більше кута запізнювання закінчення струму. Тобто $\alpha > \delta$ при синхронізації з напругою мережі або $\gamma > 0$ при синхронізації зі струмом статора. При цьому можливі режими роботи АД, які наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Можливі режими роботи АД при живленні від ТПН

Режим	Діюча лінійна напруга	Діючий фазний струм
$i_{1A} = 0$	U_{1BC}	$i_{1C} = -i_{1B}$
$i_{1B} = 0$	U_{1CA}	$i_{1A} = -i_{1C}$
$i_{1C} = 0$	U_{1AB}	$i_{1B} = -i_{1A}$

Рівняння рівноваги напруг ланцюгів статора з урахуванням умов

$$\left. \begin{aligned} u_{1BC} &= 2r_1 i_{1B} + \psi_{1BC} & \forall i_{1A} &= 0, \\ u_{1CA} &= 2r_1 i_{1C} + \psi_{1CA} & \forall i_{1B} &= 0, \\ u_{1AB} &= 2r_1 i_{1A} + \psi_{1AB} & \forall i_{1C} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

Рівняння балансу напруг ротора залежно від умов включення статора не змінюються. Матриці-стовпці потокозчеплень і струмів для несиметричних режимів формуються з повних матриць для кожного з режимів роботи. Вони представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Умови формування матриць-стовпців потокозчеплень і струмів

$i_{1A} = 0$		$i_{1B} = 0$		$i_{1C} = 0$	
ψ	i	ψ	i	ψ	I
ψ_{1BC}	i_{1B}	ψ_{1CA}	i_{1C}	ψ_{1AB}	i_{1A}
ψ_{2BC}	i_{2B}	ψ_{2CA}	i_{2C}	ψ_{2AB}	i_{2A}
ψ_{2CA}	i_{2C}	ψ_{2AB}	i_{2A}	ψ_{2BC}	i_{2B}

Матриця коефіцієнтів індуктивного зв'язку перетворюється і є єдиною для усіх можливих двофазних режимів

$$\mathbf{L} = \begin{vmatrix} 3L_1 & 1,5M_0 & -1,5M_0 \\ 3M_0 & 1,5L_2 & -1,5L_2 \\ -1,5M_0 & 1,5L_2 & 3L_2 \end{vmatrix}. \quad (2.32)$$

У процесі розрахунків одне з лінійних потокозчеплень статора знаходиться за виразом (2.31). Два інших також слід обчислювати, як початкові умови, використовувані при переході від двофазного режиму роботи до трифазного за виразами (2.33 - 2.35) [23]

$$\left. \begin{aligned} i_{1C} &= -i_{1B} \quad \forall i_{1A}, \\ \psi_{1CA} &= -1,5L_1 i_{1B} - 1,5M_0 i_{2A} + 1,5M_0 i_{2C}, \\ \psi_{1AB} &= -1,5L_1 i_{1B} + 1,5M_0 i_{2A} - 1,5M_0 i_{2B}; \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{1A} &= -i_{1C} \quad \forall i_{1B}, \\ \psi_{1BC} &= -1,5L_1 i_{1C} + 1,5M_0 i_{2B} - 1,5M_0 i_{2C}, \\ \psi_{1AB} &= -1,5L_1 i_{1C} + 1,5M_0 i_{2A} - 1,5M_0 i_{2B}; \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{1B} &= -i_{1A} \quad \forall i_{1C}, \\ \psi_{1BC} &= -1,5L_1 i_{1A} + 1,5M_0 i_{2B} - 1,5M_0 i_{2C}, \\ \psi_{1CA} &= -1,5L_1 i_{1A} - 1,5M_0 i_{2A} + 1,5M_0 i_{2C}. \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

2.3. Особливості обліку нелінійності параметрів асинхронних двигунів

Зі збільшенням частоти струму ротора, що відповідає збільшенню ковзання, у стрижнях обмотки короткозамкненого ротора виникає ефект витіснення струму. У результаті щільність струму у верхній частині стрижня зростає, а в нижній зменшується. При цьому еквівалентний активний опір ротора збільшується, а індуктивний – зменшується. Зміна опорів суттєво впливає на пускові й робочі характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Одна зі спрощених, але досить ефективних методів врахування ефекту витіснення струму при моделюванні АД, ґрунтується на використанні опорів ротора в режимі короткого замикання – R_k , X_k . Надалі ці параметри уточнюються залежно від поточного значення ковзання. При роботі АД в області номінального ковзання використовуються розрахункові опори R_n , X_n , відповідні до номінального режиму роботи. Функціональна залежність опорів від ковзання в області між R_k і R_n , X_k і X_n приймається лінійною [20].

При проектуванні асинхронних машин для зниження їх маси робоча точка номінального режиму вибирається на нелінійній ділянці характеристики намагнічування. Тобто машина є насиченою. Модель АД повинна враховувати зміну індуктивного опору контуру намагнічування у всьому діапазоні зміни

струму намагнічування. Облік насичення можливо робити за допомогою кривих, що визначають залежність опору контуру намагнічування від струму намагнічування $X_{\mu} = f(I_{\mu})$. У разі відсутності цих залежностей для конкретного АД, необхідно використовувати експериментальні дані. При моделюванні зручно застосовувати залежність зміни параметрів контуру намагнічування АД від струму намагнічування, представлену у відносних одиницях. Приклад результатів кусочно-лінійної апроксимації залежності $I_{\mu}^* = f(X_{\mu}^*)$ для АД АМУ112М4, 4 кВт представлений у табл. 2.3.

Для обліку насичення по шляху головного магнітного потоку АД необхідно за допомогою поточного поправочного коефіцієнта X_{μ}^* визначити нове значення опору контуру намагнічування

$$X_{\mu N} = X_{\mu}^* \cdot X_{\mu}, \quad (2.36)$$

де X_{μ} – індуктивний опір контуру намагнічування без обліку ефекту насичення.

Таблиця 2.3

Результати кусочно-лінійної апроксимації залежності $I_{\mu}^* = f(X_{\mu}^*)$

Діапазон зміни I_{μ}^*	X_{μ}^*
$0 \leq I_{\mu}^* \leq 0,5$	1,4
$0,5 \leq I_{\mu}^* \leq 1,0$	$X_{\mu}^* = 1,4 - 0,8 \cdot (I_{\mu}^* - 0,5)$
$1,0 \leq I_{\mu}^* \leq 2,0$	$X_{\mu}^* = 1 - 0,35 \cdot (I_{\mu}^* - 1)$
$2,0 \leq I_{\mu}^* \leq 4,5$	$X_{\mu}^* = 0,65 - 0,12 \cdot (I_{\mu}^* - 2,0)$
$4,5 \leq I_{\mu}^* \leq 9,0$	$X_{\mu}^* = 0,35 - 0,38 \cdot (I_{\mu}^* - 4,5)$
$9,0 \leq I_{\mu}^* \leq 17,0$	$X_{\mu}^* = 0,18 - 0,1 \cdot (I_{\mu}^* - 9,0)$
$17 \leq I_{\mu}^*$	$X_{\mu}^* = 0,1$

Кратність струму намагнічування визначається відношенням поточного значення амплітуди струму намагнічування до номінального значення

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu \max}}{I_{\mu n}}. \quad (2.37)$$

Номінальне значення струму намагнічування

$$I_{\mu n} = \frac{U_n}{\sqrt{(X_{\mu} + X_1)^2 + R_1^2}}, \quad (2.38)$$

де U_n – номінальна напруга АД, В;

X_{μ} , X_1 , R_1 – параметри схеми заміщення АД, Ом.

Поточне значення амплітуди струму намагнічування визначається на кожному кроці розрахунків

$$I_{\mu \max} = \left(\frac{2 \cdot I_{\mu A} - I_{\mu B} + I_{\mu C}}{3} \right)^2 + \left(\frac{I_{\mu B} - I_{\mu C}}{\sqrt{3}} \right)^2, \quad (2.39)$$

де $I_{\mu A}$, $I_{\mu B}$ і $I_{\mu C}$ – розрахункові струми намагнічування кожної з фаз АД, А.

Для обліку насичення по шляхах розсіювання можливе використання коефіцієнта насичення $K_{\text{нас}} = \frac{X_{\text{нас}}}{X_{\text{ном}}}$, який, у свою чергу, залежить від величини струму короткого замикання і може бути заданий у графічному або табличному вигляді [20].

2.4. Методи розв'язання диференціальних рівнянь

Математична модель ТПН-АД являє собою систему алгебраїчних, диференціальних і логічних рівнянь. Як правило, система містить рівняння переважно першого порядку. До них можна віднести рівняння Д'Аламбера, вираз електромагнітного моменту. Розв'язок диференціальних рівнянь передбачає застосування чисельних методів, заснованих на розкладанні в ряд Тейлора [19]. Вони розділяються на одне- і багатокрокові. При застосуванні багатокрокових (багатоступінчастих) методів при розрахунках поточного значення величини використовується інформація про декілька попередніх значень функції. Це в ряді випадків дозволяє при збереженні точності суттєво збільшити крок інтегрування та прискорити процес обчислень. Особливістю методів розрахунків цієї групи є те, що початкові значення функції повинні бути заданими або визначені іншими способами. Для асинхронного електроприводу з тиристорним перетворювачем, що характеризується нелінійністю параметрів і

несинусоїдальністю струмів, їх застосування, у більшості випадків, виявляється неефективним у зв'язку з великою величиною погрішності розрахунків.

Однокрокові методи, до яких належать методи Рунге-Кутта, передбачають визначення значення шуканої функції на підставі рішення, знайденого для одного попереднього кроку, а для першого кроку – на підставі початкових умов. Найкращим для розв'язання поточних завдань є метод Рунге-Кутта четвертого порядку, що передбачає розкладання і врахування п'яти членів ряду Тейлора. Порівняно з методами нижчого порядку, за однакового кроку інтегрування – h , метод Рунге-Кутта четвертого порядку забезпечує найбільшу точність обчислення. Розрахунковий рекурентний вираз за методом Рунге-Кутта четвертого порядку має вигляд [19]

$$y_i(x_0 + h) = y_{i0} + \frac{(n_{i1} + 2n_{i2} + 2n_{i3} + n_{i4})}{6}, \quad (2.40)$$

де

$$\left. \begin{aligned} n_{i1} &= hF_i(x_0, y_{i0}), \\ n_{i2} &= hF_i\left(x_0 + \frac{h}{2}, y_{i0} + \frac{n_{i1}}{2}\right), \\ n_{i3} &= hF_i\left(x_0 + \frac{h}{2}, y_{i0} + \frac{n_{i2}}{2}\right), \\ n_{i4} &= hF_i\left(x_0 + h, y_{i0} + \frac{n_{i3}}{2}\right). \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

Крок інтегрування h встановлюється для кожної розв'язуваної задачі індивідуально, але не повинен становити більш ніж 1/10 постійної часу елемента ЕП, що характеризується найменшою інерційністю. У разі застосування швидкодіючих програмних і апаратних засобів обчислювальної техніки для підвищення точності розрахунків слід зменшувати крок інтегрування до значень, що відповідають 1000 і більше розрахункових точок за період напруги джерела живлення.

2.5. Математичний опис тиристорних перетворювачів напруги

Тиристорний перетворювач напруги, будучи статичним пристроєм, дає змогу регулювати величину напруги, що надходить на вхід асинхронного двигуна. Під час моделювання перетворювача необхідно на кожному кроці інтегрування контролювати стан силових вентилів з урахуванням їх неповної керованості, визначати поточну конфігурацію силових електричних кіл, обчислювати напруги, що прикладаються до них, формувати й розв'язувати відповідну систему рівнянь. При цьому інформаційні властивості ТПН враховуються алгоритмом роботи тиристорів, а енергетичні – рівняннями стану. Зміна конфігурації кіл і перехід до нової системи рівнянь мають супроводжуватися обов'язковим узгодженням кінцевих і початкових електромагнітних умов. Для спрощення математичного опису та моделювання ТПН-АД можливо ввести допущення, що тиристори є ідеальними ключами з односторонньою провідністю; власна енергетика перетворювача не впливає на процеси, що відбуваються в асинхронному двигуні.

Під час моделювання ТПН необхідно і достатньо зафіксувати моменти ввімкнення і вимкнення вентилів. Для контролю стану тиристорів вводяться логічні функції – FA, FB, FC, звані комутаційними. Вони можуть набувати значень 1 або 0, залежно від наявності або відсутності струму у відповідній фазі АД. Електропривод може перебувати в п'яти станах, що описуються різними системами рівнянь. Це – трифазне підключення до ПІ, три варіанти двофазного ввімкнення і повне вимкнення двигуна. Умови формування комутаційних функцій не залежать від способу синхронізації вентилів ТПН. Напрямок струму у фазі або провідність одного тиристора з пари контролювати не обов'язково, тому що знак струму в моделі визначається станом ланцюгів і напруг живлення на заданому інтервалі часу, а не властивостями односторонньої провідності вентилів, присутність яких у моделі імітується. Головним під час формування комутаційних функцій є контроль переходу струму через нуль. Для цього

необхідно контролювати стан не тільки на поточному, а й на попередньому кроці розрахунку [5].

Діаграма формування комутаційних функцій тиристорів для ТПН із синхронізацією з напругою мережі показана на рис. 2.1. Рисунок ілюструє фазні напруги та струми двигуна, пилоподібний сигнал, що відповідає фазі напруги або поточному значенню кута керування – α , а також відповідні комутаційні функції – $F_A, (F_B, F_C)$. Умови формування комутаційних функцій визначаються на підставі логічних виразів (2.42)

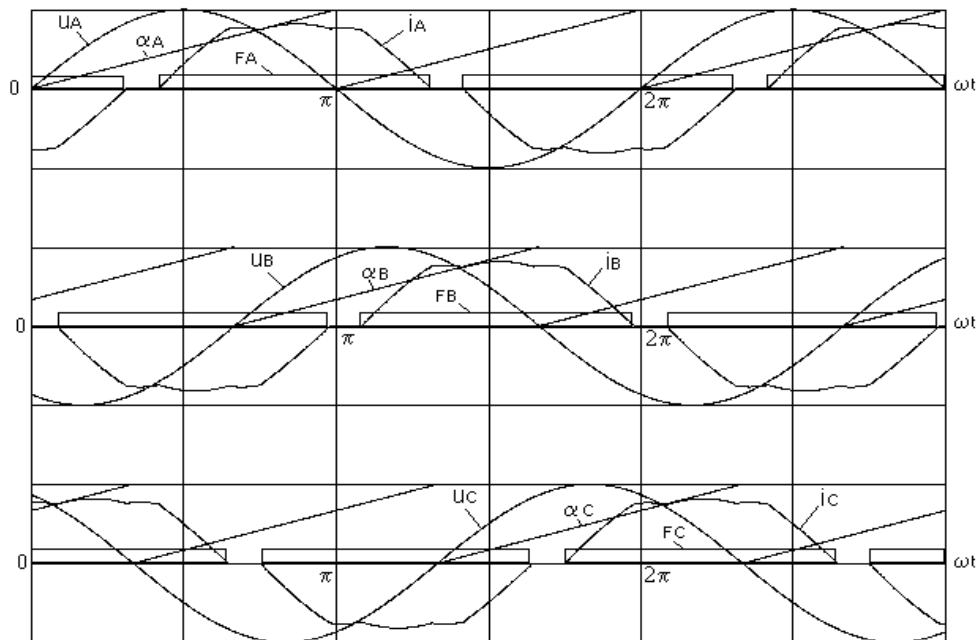


Рис. 2.1. Діаграма формування комутаційних функцій тиристорів ТПН

$$F(i) = \begin{cases} 0 & \forall (i_{in} = 0) \& (\alpha_i < \alpha_z), \\ 1 & \forall (\alpha_i \geq \alpha_z), \\ 1 & \forall (i_{in} \cdot i_{i(n-1)}) > 0, \end{cases} \quad (2.42)$$

де i_{in} і $i_{i(n-1)}$ – струм i -й фази на n -м і $(n-1)$ кроці розрахунків, А;

α_n і α_z – кут включення вентилів поточний і заданий, рад.

Вимикання вентиля і припинення струму у фазі контролюється за зміною знаку струму [23]

$$i_i = 0 \quad \forall (i_{in} \cdot i_{i(n-1)}) < 0. \quad (2.43)$$

У загальному випадку, в умовах несиметрії живлення, пилкоподібний сигнал кута вмикання вентилів при синхронізації з напругою мережі, формується за залежностями

$$\left. \begin{aligned} \alpha_A &= \omega_0 \frac{t}{\pi} - \text{Fix} \left(\omega_0 \frac{t}{\pi} \right), \\ \alpha_B &= \frac{\left(\omega_0 \frac{t}{\pi} + \varphi_{fb} \right)}{\pi} - \text{Fix} \left[\frac{\left(\omega_0 \frac{t}{\pi} + \varphi_{fb} \right)}{\pi} \right], \\ \alpha_C &= \frac{\left(\omega_0 \frac{t}{\pi} + \varphi_{fc} \right)}{\pi} - \text{Fix} \left[\frac{\left(\omega_0 \frac{t}{\pi} + \varphi_{fc} \right)}{\pi} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

де φ_{fb} – фазовий кут зсуву, на яке вектор \vec{U}_B випереджає \vec{U}_A , рад;

φ_{fc} – фазовий кут зсуву, на яке вектор \vec{U}_C випереджає вектор \vec{U}_A , рад;

Fix – функція, що позначає цілу частину числа.

Кути вмикання тиристорів вимірюються у відносних одиницях, де за одиницю прийняте число π , як можливий діапазон зміни кутів керування α . Для тиристорного перетворювача із синхронізацією зі струмом навантаження початок відліку кута включення не може бути задане з використанням поточного часу або фази у силу фізичних особливостей. Відлік кута починається тільки коли закінчується струм у попередній півхвилі. Логічні умови мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} \gamma_i &= 0 \quad \forall (F_i = 1), \\ \gamma_i &= \gamma_{i(n-1)} + \omega_0 h \cdot \frac{3}{\pi} \quad \forall (F_i = 0) \ \& \ (\gamma_{i(n-1)} < \gamma_z), \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

де h – крок розрахунків, в.о.

Значення безструмової паузи γ також вимірюється у відносних одиницях. За базу прийнятий кут $\pi/3$ з урахуванням меншого, ніж при СН діапазону його зміни. У випадку використання СС при формуванні комутаційних функцій у вирази (2.42) слід записувати значення без струмової паузи γ замість кута керування α . Структура моделі змінюється залежно від поточних значень комутаційних функцій, а так само від їх суми $SF = FA + FB + FC$. $SF = 3$ – симетричний трифазний режим; $SF = 2$ – струм в одній з фаз відсутній, що відповідає двофазному режиму роботи АД; $SF = 0$ – повне відключення двигуна від джерела живлення і вибіг. Вид двофазного режиму залежить від того, у який з фаз комутаційна функція стала рівною нулю [24].

2.6. Модель джерела живлення

При математичному описі використовуються допущення, згідно з якими джерело живлення характеризується синусоїдальністю, відсутністю провалів і коливань напруг. У випадку симетрії ДЖ система рівнянь фазних напруг, які підводяться до тиристорного перетворювача має вигляд

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \sqrt{2}U_a \sin(\omega_0 t + \varphi_{fa}), \\ u_b &= \sqrt{2}U_b \sin\left(\omega_0 t + \varphi_{fa} + \frac{4\pi}{3}\right), \\ u_c &= \sqrt{2}U_c \sin\left(\omega_0 t + \varphi_{fa} + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

де φ_{fa} – фазовий кут зсуву вектора \vec{u}_A , приймається рівним нулю, рад.

На підставі системи рівнянь розраховуються миттєві значення напруг на кожному з кроків розрахунку.

При використанні лінійних величин

$$\left. \begin{aligned} u_{AB} &= u_a - u_b, \\ u_{BC} &= u_b - u_c, \\ u_{AC} &= u_c - u_a. \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

Методика формування напруг для випадку живлення електроприводу від джерела з несиметричною напругою має свої особливості та буде розглянута в подальшому.

2.7. Алгоритм моделі електроприводу ТПН-АД

Модель електроприводу ТПН-АД виконується на підставі моделей усіх елементів, що входять до її складу. Схему алгоритму моделі представлено на рис. 2.2. Розрахунок, виконаний на основі зазначеного алгоритму, дає змогу моделювати пуск і сталий режим роботи. Введення вихідних даних передбачає завдання оператором усіх параметрів блоків ЕП, що відповідають умовам і режиму роботи. Обов'язковими для завдання є: початкові електромагнітні умови, параметри АД, сумарний момент інерції ЕП, величина і характер моменту навантаження, кут керування ТПН, час заданого циклу тощо.

Початкові дані проходять підготовку, характерними прикладами якої є перерахунок параметрів АД з Г-подібної схеми в Т-подібну, а також розрахунок додаткових початкових даних на підставі введених. Формування трифазної системи напруг виконується на підставі моделі джерела живлення. Подальша робота моделі передбачає врахування нелінійностей параметрів АД і пуск шляхом під'єднання двигуна до живлення. Залежно від способу синхронізації ТПН моделювання процесу пуску має низку особливостей. В електроприводі з СН задаються нульові початкові умови за часом, і під'єднання до ДЖ відбувається при досягненні в будь-якій з фаз умови $\alpha_i \geq \alpha_z$. За умовою синхронізації зі струмом СІФК нормально працює тільки за наявності струму у фазах. Це, як і в реальних системах ЕП з ТПН, зумовлює існування проблеми "першого ввімкнення".

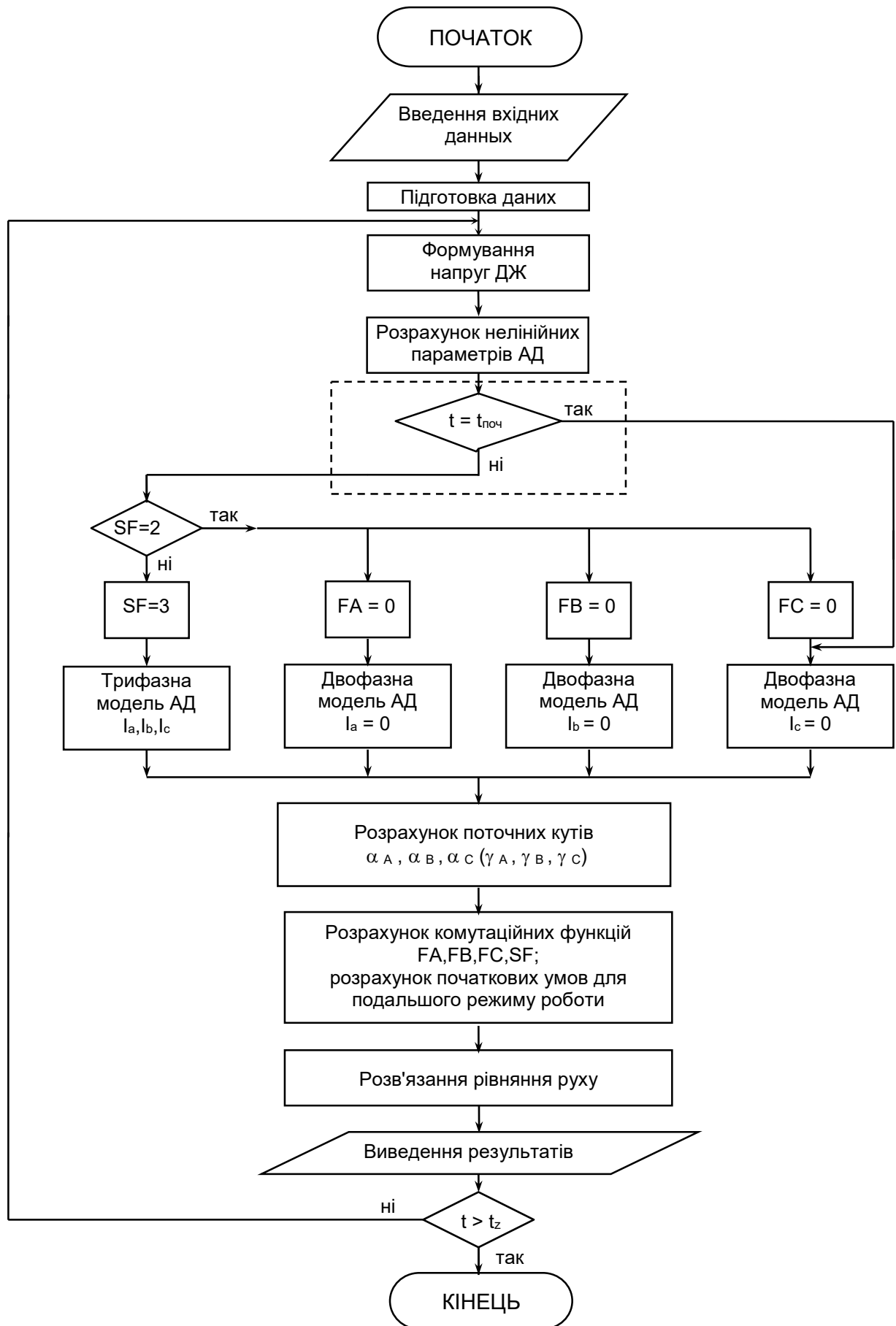


Рис. 2.2 . Схема алгоритму моделі електропривода ТПН-АД

Перше ввімкнення АД здійснюється у двофазному режимі на будь-яку лінійну напругу з кутом ввімкнення вентилів 120 ел. град., що відповідає м'яким умовам ввімкнення. Для цього СІФК з СН не використовується, а в початкових умовах за часом задається час $t = 0,00666(6)$ с. Одночасно з першим увімкненням починається відлік значення безструмової паузи γ для подальшого увімкнення тиристорів у знеструмленій фазі. У разі настання умови $\gamma \geq \gamma_z$ або $t_{\text{нач}} > 0,006666 + \gamma/\omega_0$ двигун переводиться у трифазний режим роботи і далі відбувається почергова зміна режимів роботи. У разі використання тиристорного перетворювача з СН зі схеми моделі вилучається блок контролю початкових умов увімкнення, виділений у схемі пунктирною лінією. Залежно від умов формування режимів роботи АД здійснюється перехід до три- або двофазних моделей. Це зумовлює проблему узгодження кінцевих електромагнітних умов трифазного включення з початковими умовами двофазного режиму роботи АД. Перехід здійснюється за умовою зміни знака струму, який на попередньому кроці розрахунку хоча й близький, але не дорівнює нулю, а на наступному кроці йому умовно присвоюється значення, що дорівнює нулю. Наслідки такої нестиківки виражаються в появі в кривій моменту сплесків, що спотворюють його реальну форму. Частково цю проблему можна рішити за рахунок кардинального зменшення кроку інтегрування – h . Однак, виходячи з умови безперервності потокозчеплень невідключених фаз під час кожного переходу до двофазного режиму, необхідно за відомими на попередньому кроці розрахунку потокозчепленнями ротора й одним із лінійних потокозчеплень статора знаходити нові значення струмів статора й ротора, що відповідають новій конфігурації схеми. Слід розв'язувати рівняння (2.9), у які необхідно підставляти матриці-стовпчики залежно від схеми ввімкнення згідно з табл. 2.2 і матрицю коефіцієнтів (2.32).

Подальший розрахунок передбачає визначення поточних кутів α для ТПН із СН або значень безструмових пауз γ для ТПН із СТ. Після розрахунку комутаційних функцій слід виконувати фіксування умов роботи АД, які для наступного циклу розрахунку будуть розглядатися як початкові умови роботи.

Після розв'язання одним із чисельних методів інтегрування рівняння руху, поточне значення невідомої функції подається у вигляді, зручному для оператора. Після цього цикл розрахунку повторюється. При досягненні розрахункового часу t заданого значення часу циклу t_z процес моделювання завершується.

РОЗДІЛ 3

СТІЙКОСТЬ РОЗІМКНУТОЇ СИСТЕМИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТПН

3.1. Природа виникнення коливань, види та особливості коливальних процесів

Як показали численні експерименти, у розімкнутих системах електропривода "Тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун", СІФК яких має синхронізацією з напругою мережі, на робочій ділянці механічних характеристик можуть спостерігатися автоколивання вихідних величин [10,11]. Коливання порушують нормальну роботу розімкнених систем ЕП, ускладнюють розрахунок і налаштування замкнених систем, погіршують якість регулювання координат і енергетику ЕП. Характер і кількісні показники коливальних процесів дуже різні. Встановлено, що вони залежать від безлічі параметрів і умов:

- величини кута включення вентилів;
- параметрів АД та ТПН;
- моменту навантаження на валу АД та його швидкості;
- сумарного моменту інерції ЕП;
- початкових електромагнітних умов (ПЕМУ);
- схемотехнічної конструкції ТПН;
- способу синхронізації вентилів.

Появу автоколивань у розімкнених системах ТПН-АД можна пояснити наявністю позитивного зворотного зв'язку між кутом зсуву струму навантаження й амплітудою першої гармоніки вихідної напруги перетворювача, а також нелінійністю параметрів електропривода. Коливальний процес можна умовно розділити на дві категорії – режими "малих" і "великих" коливань. "Малі" коливання – це гармонійні коливання вихідних параметрів АД, що не загасають,

за умови, що швидкість ротора змінюється в межах першого квадранта (не перевищує синхронну, тобто $0 < \omega < \omega_0$).

Фізично, цей вид автоколивань пов'язаний з обміном енергії між електромагнітними контурами та інерційними маховими масами електроприводу. Характерні графіки швидкості, моменту і струму АД у режимі "малих" коливань, які побудовані за допомогою моделі, показані на рис. 3.1.

Друга категорія – це режим великих коливань (рис. 3.2). У цьому разі швидкість двигуна може перевищити синхронну, а область коливань охоплює перший і другий квадранти. Показова поведінка розімкнутої системи ЕП у режимі пуску під час підходу до синхронної швидкості та в області перерегулювання. Якщо параметри АД і умови пуску створюють передумови до перерегулювання швидкості, то при наближенні до підсинхронної швидкості фаза струму збільшується, а вихідна напруга перетворювача завдяки дії внутрішнього зворотного зв'язку підвищується. За швидкості, вищої за синхронну, коли фаза струму стає більшою за 90 ел. град, процес супроводжується практично повним відкриттям вентилів, незалежно від заданого кута ввімкнення. Завдяки електромагнітній інерційності двигун продовжує залишатися у руховому режимі за швидкості вище синхронної, що сприяє посиленню процесу перерегулювання. У результаті в ТПН-АД з синхронізацією вентилів із напругою мережі перерегулювання розвивається завжди, як за номінальної напруги, навіть якщо задано штучну механічну характеристику з напругою меншою за номінальну.

Електропривод може увійти в режим великих коливань із перерегулюванням за швидкістю до 40% і провалами до $0,5\omega_0$. Період коливань охоплює процес різкого гальмування одним або декількома імпульсами моменту до деякої мінімальної швидкості і подальший розгін АД. Особливості процесів у режимі великих коливань дають змогу стверджувати, що їх виникнення пов'язане не стільки зі зміною швидкості ротора та обміном енергії, скільки з коливальним рухом і взаємодією між собою узагальнених векторів напруги мережі та ЕРС обмоток статора, а також потокозчеплень статора і ротора [26].

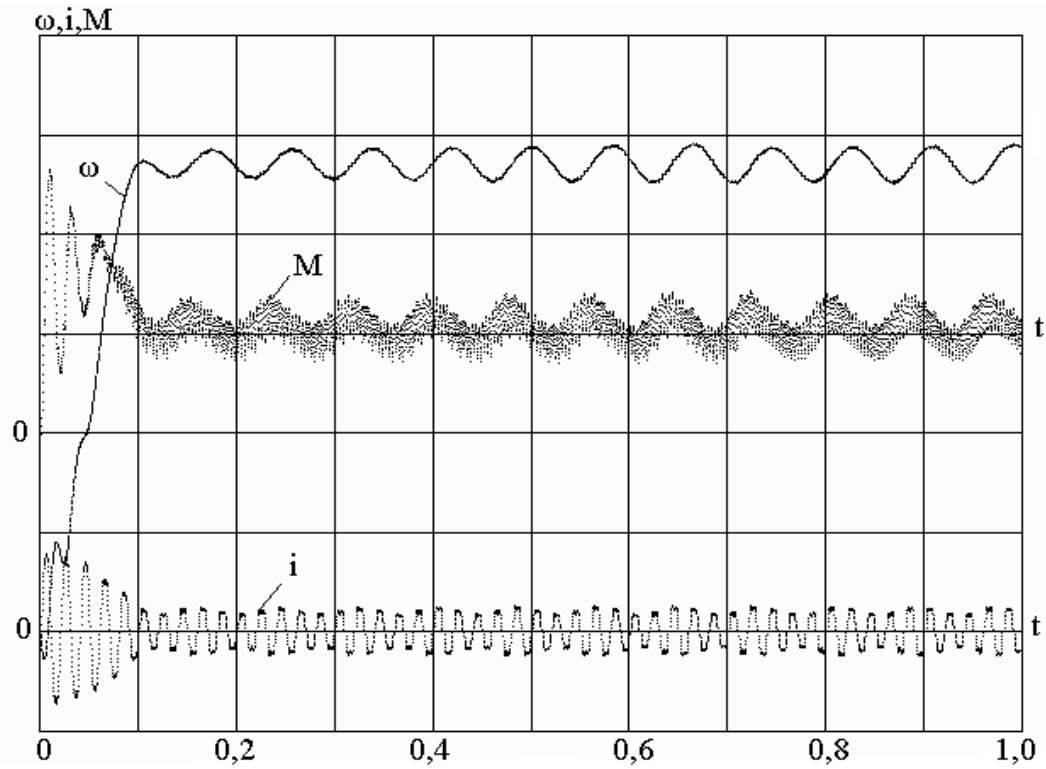


Рис. 3.1. Графіки швидкості, моменту і струму 4АМУ90L4 у режимі "малих" коливань; $\alpha = 45$ ел. град., $M_c = 0,9M_H$, $J_\Sigma = J_{дв}$. Масштаби: $m_i = 4I_H/\text{дел.}$; $m_M = 1\text{Мн}/\text{дел.}$; $m_\omega = 0,2\omega_0/\text{дел.}$

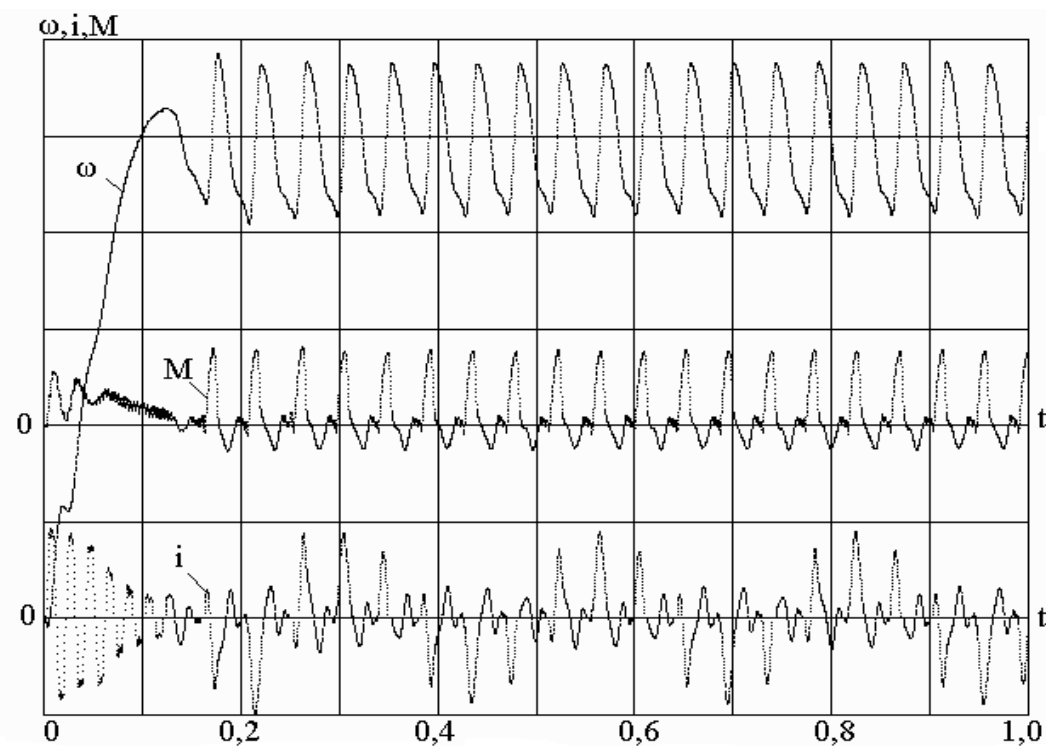


Рис. 3.2. Графіки швидкості, моменту і струму 4АМУ90L4 у режимі "великих" коливань; $\alpha = 60$ ел. град., $M_c = 0,5M_H$, $J_\Sigma = J_{дв}$. Масштаби: $m_i = 2,5I_H/\text{дел.}$; $m_M = 4\text{Мн}/\text{дел.}$; $m_\omega = 0,2\omega_0/\text{дел.}$

3.2. Методи дослідження стійкості та визначення коливань

3.2.1. Динамічні властивості асинхронних двигунів. Реальні перехідні процеси асинхронного електропривода супроводжуються зміною швидкості АД. Однак, у низці випадків, корисно використовувати результати розв'язання системи диференціальних рівнянь асинхронної машини за постійної швидкості її обертання. Розрахункову структурну схему розімкнутої системи ТПН-АД зображено на рис. 3.3 [27].

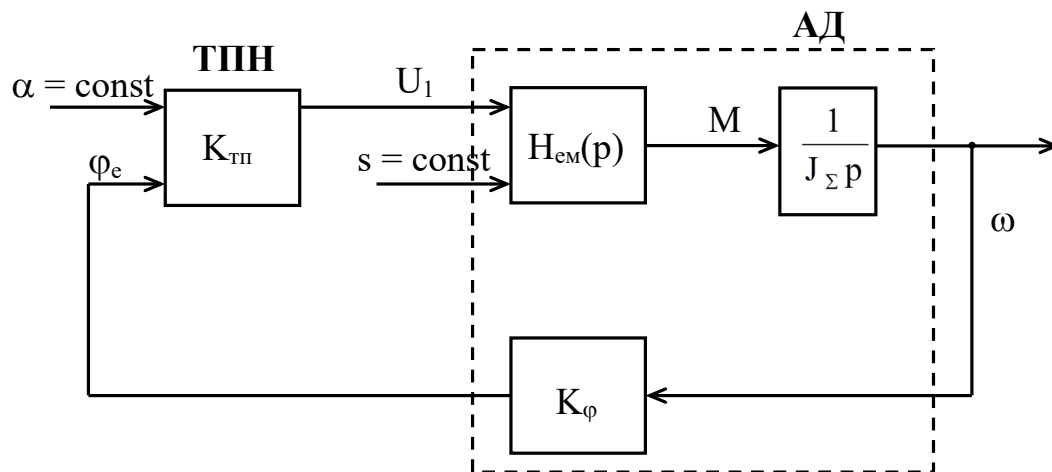


Рис. 3.3. Розрахункова структурна схема розімкнутої системи ТПН-АД

Характерною особливістю наведеної схеми є застосування залежності фази струму не від ковзання, а від поточного значення швидкості. За такого подання вихідні сигнали всіх ланок мають пряму залежність від вхідних сигналів, а внутрішній контур системи являє собою позитивний зворотний зв'язок. Під час математичного опису елементів структурної схеми виконується врахування їхніх нелінійних властивостей. Асинхронний двигун зображується трьома ланками з передавальними функціями, які позначаються

$H_{em}(p)$ – передавальна функція електромагнітної частини АД;

$H_m(p) = \frac{1}{J_\Sigma p}$ – передавальна функція електромеханічної частини ЕП;

$H_{зз}(p) = K_\phi$ – передавальна функція ланки внутрішнього зворотного зв'язку,

за кутом навантаження;

де $K_\varphi = \frac{\Delta\varphi_e}{\Delta\omega}$ – змінна величина, що залежить від значення поточної швидкості;

J_Σ – сумарний наведений момент інерції ЕП, кг·м².

Тиристорний перетворювач представлений підсилювальною ланкою з коефіцієнтом посилення $K_{\text{тп}}$, який при переході до приростів визначається

$$K_{\text{тп}} = \frac{\Delta U_1}{\Delta\phi_e}, \quad (3.1)$$

у точці, що визначається кутом керування α і ковзанням s .

Істотна нелінійність, що вводиться вентилями, враховується за рахунок апроксимації вихідної напруги ТПН. Рівняння амплітуди напруги першої гармоніки U_1 , отримані у процесі ідентифікації, мають вигляд [27].

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= -0,1291 + 0,06165 \cdot \phi_e - 7,2407 \cdot 10^{-4} \cdot \phi_e^2, \\ A_1 &= -0,02723 - 0,0015212 \cdot \phi_e + 2,038 \cdot 10^{-5} \cdot \phi_e^2, \\ A_2 &= -2,1534 \cdot 10^{-4} + 8,2836 \cdot 10^{-6} \cdot \phi_e - 1,1941 \cdot 10^{-7} \cdot \phi_e^2, \\ U_1 &= A_0 + A_1 \cdot \alpha + A_2 \cdot \alpha^2, \end{aligned} \right\} (3.2)$$

з урахуванням рекомендованих обмежень

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= 1 \quad \forall \alpha \leq \phi_e, \\ U_1 &= 1 \quad \forall U_1 > 1, \\ U_1 &= 0 \quad \forall U_1 < 1. \end{aligned} \right\} (3.3)$$

Фаза струму визначається за еквівалентними значеннями активних і реактивних складових опорів схеми заміщення АД

$$\phi_e = \arctg \frac{x_e}{r_e}, \quad (3.4)$$

де x_e, r_e – еквівалентні опори асинхронного двигуна для Т-подібної схеми заміщення, Ом, які визначаються

$$\left. \begin{aligned} r_e &= r_1 + \frac{x_0^2 r_2' / s}{(x_2' + x_0)^2 + \left(\frac{r_2'}{s}\right)^2}, \\ x_e &= x_1 + x_0 - \frac{x_0^2 (x_2' + x_0)}{(x_2' + x_0)^2 + \left(\frac{r_2'}{s}\right)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Ланка, що характеризує електромагнітну складову асинхронного двигуна, описується на підставі аналітичного виразу, що визначає перехідну частину електромагнітного моменту АД, як реакцію на стрибок вхідної напруги [28].

$$M_{\text{ем}} = \sum_{i=1}^9 M_i. \quad (3.6)$$

Цей вираз містить дев'ять складових, з яких перша – це сталі значення моменту, дві – експоненціальні, три – косинусні та три – синусні складові

$$M_1 = \frac{3U_1^2 R_2' p}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_k^2 \right]}, \quad (3.7)$$

$$M_2(t) = A_2 e^{-2\alpha_1 \omega_0 t} = A_2 e^{-\frac{1}{T_2} t}, \quad (3.8)$$

$$M_3(t) = A_3 e^{-2\alpha_2 \omega_0 t} = A_3 e^{-\frac{1}{T_3} t}, \quad (3.9)$$

$$M_4(t) = A_4 e^{-\alpha_1 \omega_0 t} \cos \omega_1 \omega_0 t = A_4 e^{-\frac{1}{T_4} t} \cos \Omega_4 t, \quad (3.10)$$

$$M_5(t) = A_5 e^{-\alpha_2 \omega_0 t} \cos \omega_2 \omega_0 t = A_5 e^{-\frac{1}{T_5} t} \cos \Omega_5 t, \quad (3.11)$$

$$M_6(t) = A_6 e^{-(\alpha_1 + \alpha_2) \omega_0 t} \cos(\omega_1 - \omega_2) \omega_0 t = A_6 e^{-\frac{1}{T_6} t} \cos \Omega_6 t, \quad (3.12)$$

$$M_7(t) = A_7 e^{-\alpha_1 \omega_0 t} \sin \omega_1 \omega_0 t = A_7 e^{-\frac{1}{T_7} t} \sin \Omega_7 t, \quad (3.13)$$

$$M_8(t) = A_8 e^{-\alpha_2 \omega_0 t} \sin \omega_2 \omega_0 t = A_8 e^{-\frac{1}{T_8} t} \sin \Omega_8 t, \quad (3.14)$$

$$M_9(t) = A_9 e^{-(\alpha_1 + \alpha_2) \omega_0 t} \sin(\omega_1 - \omega_2) \omega_0 t = A_9 e^{-\frac{1}{T_9} t} \sin \Omega_9 t. \quad (3.15)$$

Амплітуди A_i , частоти вільних коливань ω_i і постійні часу загасання T_i експоненціальних і періодичних складових залежать від параметрів двигуна, значень ковзань ротора і характеризуються двома коефіцієнтами загасання (α_1, α_2) і двома базовими частотами коливань (ω_1, ω_2) [29]

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2}[(\alpha'_s + \alpha'_r) - a], \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2}[(\alpha'_s + \alpha'_r) - a], \\ \omega_1 &= \frac{1}{2}[(1+s) \mp b], \\ \omega_2 &= \frac{1}{2}[(1+s) \pm b]. \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Коефіцієнти a і b знаходяться за виразами

$$\left. \begin{aligned} a &= \pm \sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} + A}{2}}, \\ b &= \pm \sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} - A}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Коефіцієнти A і B визначаються

$$\left. \begin{aligned} A &= (\alpha'_r + \alpha'_s)^2 - (1-s)^2 - 4\alpha'_r\alpha'_s\sigma, \\ B &= 2(\alpha'_s + \alpha'_r) \cdot (1-s), \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha'_s &= \frac{\alpha_s}{\sigma}; \quad \alpha_s = \frac{r_1}{x_s}; \\ \sigma &= 1 - \frac{x_0^2}{x_s x_r}; \\ \alpha'_r &= \frac{\alpha_r}{\sigma}; \quad \alpha_r = \frac{r_2}{x_r}, \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

де r_1, r_2 – активні опори статора і ротора АД, відповідно, Ом; x_s, x_r, x_0 – реактивні опори, відповідно, статора, ротора і ланцюга намагнічування АД, які визначаються за схемою заміщення, Ом.

Нелінійні властивості АД враховуються за рахунок зміни величин опорів x_e і r_e і, як наслідок, кута навантаження φ_e . Розглядаються властивості двигунів

під час ковзання в діапазоні $0 \leq s \leq s_k$, тобто на робочій ділянці механічної характеристики. На рис. 3.4 зображено графіки складових електромагнітного моменту під час увімкнення з нульовими ПЕМУ та номінальним ковзанням АД для декількох чотириполюсних асинхронних двигунів серії АМУ різних типорозмірів. Розрахунок значень графіків виконували при врахуванні всіх складових (3.7) - (3.15), за нульових початкових електромагнітних умов і постійного ковзання, що дорівнює номінальному. У табл. 3.1 наведено параметри, що характеризують кожен зі складових АД. Для експоненціальних складових – це амплітуди та електромагнітні постійні часу загасання, для косинусних і синусних складових – це максимальні амплітуди, електромагнітні постійні часу загасання і частоти вільних коливань. Приведені результати дають можливість простежити характер зміни окремих складових залежно від параметрів електродвигунів. Так, амплітуди експоненціальних і косинусних складових більш виражені у двигунів меншої потужності. Зі зростанням потужності АД вони значно зменшуються. Синусні складові, навпаки, сильніше проявляються зі зростанням потужності АД. Електромагнітні постійні часу загасання T_i значно залежать від параметрів двигунів. Очевидно, що за постійного ковзання постійні часу загасання окремих складових збільшуються зі зростанням номінальної потужності АД. Це підтверджує відомий факт, що сумарний електромагнітний момент малопотужних двигунів набагато раніше досягає усталеного значення. Важливо зазначити, що для двигунів усіх типорозмірів, в усьому діапазоні ковзань 4-та і 7-ма періодичні складові характеризуються максимальними постійними часу загасання T_4 , T_7 (табл. 3.1), а отже, визначають тривалість загасання перехідного електромагнітного моменту в цілому [30]. Частоти вільних коливань періодичних складових моменту також визначаються складною функцією параметрів асинхронної машини. Фізичний сенс негативних частот вільних коливань для 6-х і 9-х складових полягає у зміні напрямку обертання цих складових електромагнітного моменту. Це виражається в тому, що періодичні складові, які обертаються прямо і зворотно, перебувають у протифазі, наприклад, M_8 і M_9 , зображені на рис. 3.4,б.

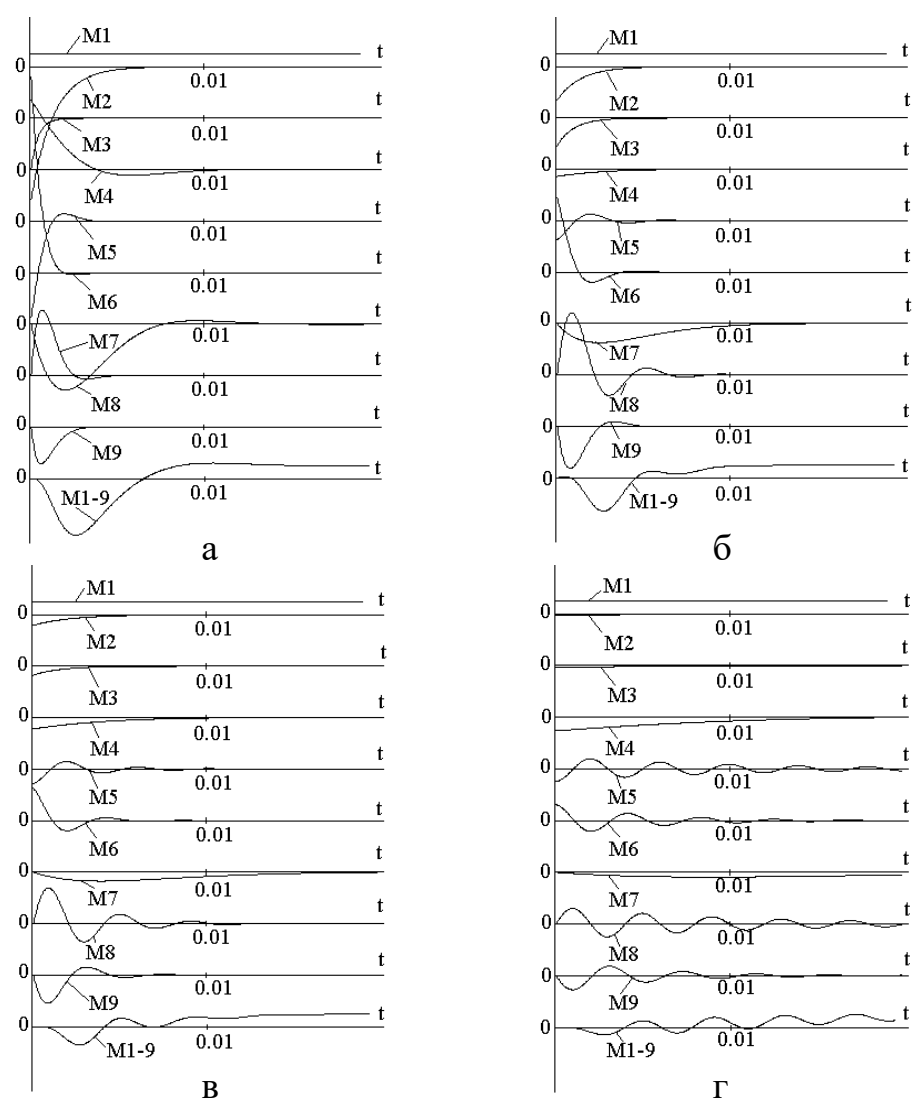


Рис. 3.4. Графіки складових електромагнітного моменту АД під час увімкнення з нульовими ПЕМУ і номінальним ковзанням:
 а - 4АМУ100L4; б - 6АМУ132S4; в - 6АМУ180S4; г - 4АМУ280M4

Представляє інтерес також дослідження залежностей базових частот і коефіцієнтів загасання (постійних часу) від ковзання АД. На рис. 3.5 наведено залежності значень коефіцієнтів загасання і базових частот перехідних моментів від ковзань для декількох АД. На підставі цих залежностей можна стверджувати, що умова $\alpha_1 \leq \alpha_2$, виконується для усіх розглянутих АД. Тому, саме перший коефіцієнт загасання α_1 визначає тривалість електромагнітного перехідного процесу в усьому діапазоні ковзань. З іншого боку, зі збільшенням потужності АД, у разі ковзань, менших за певне значення, характерне тільки для цього двигуна, коефіцієнти загасання α_1 та α_2 рівні. У цьому разі складові M_4 , M_5 , M_7 ,

M_8 мають однакові постійні часу загасання, які й визначають тривалість електромагнітного перехідного процесу. Для всіх типів двигунів базові частоти ω_1 и ω_2 при ковзанні, що дорівнює одиниці, дорівнюють максимальному значенню. Під час зменшення ковзання до деякого, характерного для даного двигуна значення, спостерігається зменшення обох базових частот. Однак за подальшого зменшення ковзання частота ω_1 продовжує зменшуватися, тоді як ω_2 знову зростає.

Таблиця 3.1

Параметри складових перехідного моменту під час пуску асинхронних двигунів з нульовими ПЕМУ і постійним номінальним ковзанням

Складова моменту		Характеризуючі параметри	Асинхронний двигун			
№	Вид складової		4АМУ100 L4, 4,0 кВт	6АМУ132 M4, 11 кВт	4АМУ18 0M4, 30,0 кВт	4АМУ280 M4, 132 кВт
M_1	Постійна	$A_1, M_{уст}$	1,000	1,000	1,000	1,000
M_2	Експонен.	$A_2, о.е.$	-8,369	-2,620	-1,285	-0,356
		$T_2, с$	$6,67 \cdot 10^{-3}$	$6,71 \cdot 10^{-3}$	$10,7 \cdot 10^{-3}$	$26,7 \cdot 10^{-3}$
M_3	Експонен.	$A_3, о.е.$	-3,184	-2,171	-1,029	-0,381
		$T_3, с$	$2,14 \cdot 10^{-3}$	$4,91 \cdot 10^{-3}$	$7,71 \cdot 10^{-3}$	$26,6 \cdot 10^{-3}$
M_4	Косинусна	$A_{4(max)},$	4,185	-0,542	-0,743	-1,023
		$T_4, с$	$17,41 \cdot 10^{-3}$	$21,43 \cdot 10^{-3}$	$33,62 \cdot 10^{-3}$	$46,41 \cdot 10^{-3}$
		$\Omega_4, с^{-1}$	85,65	39,77	18,37	4,23
M_5	Косинусна	$A_{5(max)},$	-6,185	-1,458	-1,257	-0,976
		$T_5, с$	$4,28 \cdot 10^{-3}$	$10,43 \cdot 10^{-3}$	$15,41 \cdot 10^{-3}$	$53,02 \cdot 10^{-3}$
		$\Omega_5, с^{-1}$	246,56	288,69	304,42	312,91
M_6	Косинусна	$A_{6(max)},$	12,553	5,723	3,314	1,731
		$T_6, с$	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$5,67 \cdot 10^{-3}$	$8,96 \cdot 10^{-3}$	$26,62 \cdot 10^{-3}$
		$\Omega_6, с^{-1}$	-160,91	-248,91	-286,04	-308,69
M_7	Синусна	$A_{7(max)},$	-5,091	-6,923	-6,158	-5,844
		$T_7, с$	$13,33 \cdot 10^{-3}$	$17,41 \cdot 10^{-3}$	$21,43 \cdot 10^{-3}$	$53,47 \cdot 10^{-3}$
		$\Omega_7, с^{-1}$	85,65	39,77	18,37	4,23
M_8	Синусна	$A_{8(max)},$	5,091	6,923	6,158	5,844
		$T_8, с$	$4,28 \cdot 10^{-3}$	$10,43 \cdot 10^{-3}$	$15,41 \cdot 10^{-3}$	$53,02 \cdot 10^{-3}$
		$\Omega_8, с^{-1}$	246,56	288,69	304,42	312,91
M_9	Синусна	$A_{9(max)},$	5,091	6,923	6,158	4,844
		$T_9, с$	$3,24 \cdot 10^{-3}$	$5,67 \cdot 10^{-3}$	$8,96 \cdot 10^{-3}$	$26,62 \cdot 10^{-3}$
		$\Omega_9, с^{-1}$	-160,91	-248,91	-286,04	-308,69

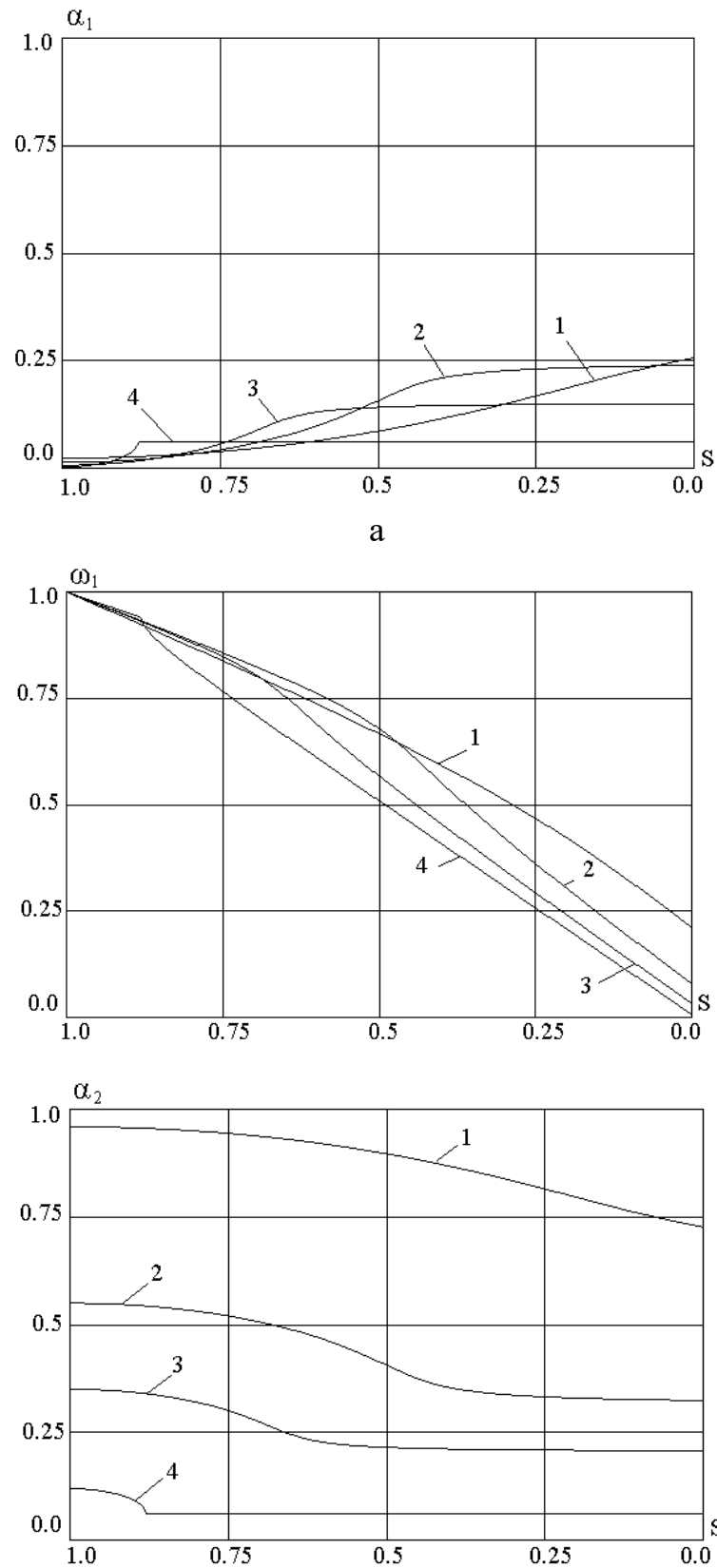


Рис. 3.5. Залежності значень коефіцієнтів загасання і базових частот перехідних моментів від ковзань а - α_1 ; б - α_2 ; в - ω_1 ; г - ω_2 ; для двигунів: а - 4АМУ100L4; б - 6АМУ132М4; в - 4АМУ180М4

3.2.2. Розробка та застосування математичного методу дослідження стійкості. З результатів розрахунків випливає, що для двигунів різних габаритів і потужностей характер зміни моменту не однаковий. Це пояснюється, насамперед, різним характером зміни кожної зі складових, які, своєю чергою, залежать від параметрів конкретно взятого двигуна. Так, електромагнітну частину АД можна описати, використовуючи не всі складові (3.7) - (3.15), а тільки деякі, найзначущіші з них. Наприклад, для двигуна 4АМУ100L4, 4 кВт задовільне наближення дає електромагнітний момент, представлений однією косинусоїдою, еквівалентною 4-6 складовим, і однією експонентою, еквівалентною 2-3 складовим (рис. 3.6,б, рис. 3.7,а).

Однак, для інших двигунів, наприклад, для потужного двигуна 4АМУ280М4, 132 кВт, отримана на основі апроксимації вказаними складовими залежність електромагнітного моменту вельми значно відрізняється від залежності, за умови врахування усіх аперіодичних та періодичних складових (рис. 3.6,г та рис. 3.7,б). Це призводить до висновку, що для розроблення комплексного методу дослідження стійкості необхідно проводити облік усіх змінних складових електромагнітного моменту. Це значно ускладнює завдання математичного розрахунку, проте дає змогу найповніше і найточніше описати електромагнітну частину будь-якого довільного асинхронного двигуна.

Перехід від часових залежностей (3.7) - (3.15) до передавальної функції ланки, що описує електромагнітну частину АД, можливий за допомогою перетворення Лапласа [31].

$$H(p) = p \cdot L \{ h(t) \}, \quad (3.20)$$

де $L \{ h(t) \}$ – зображення перехідної функції ланки як суми кожної зі складових (3.7) – (3.15).

Наприклад, перехід від часової залежності складової M_4 (загасаючої косинусоїди) має вигляд

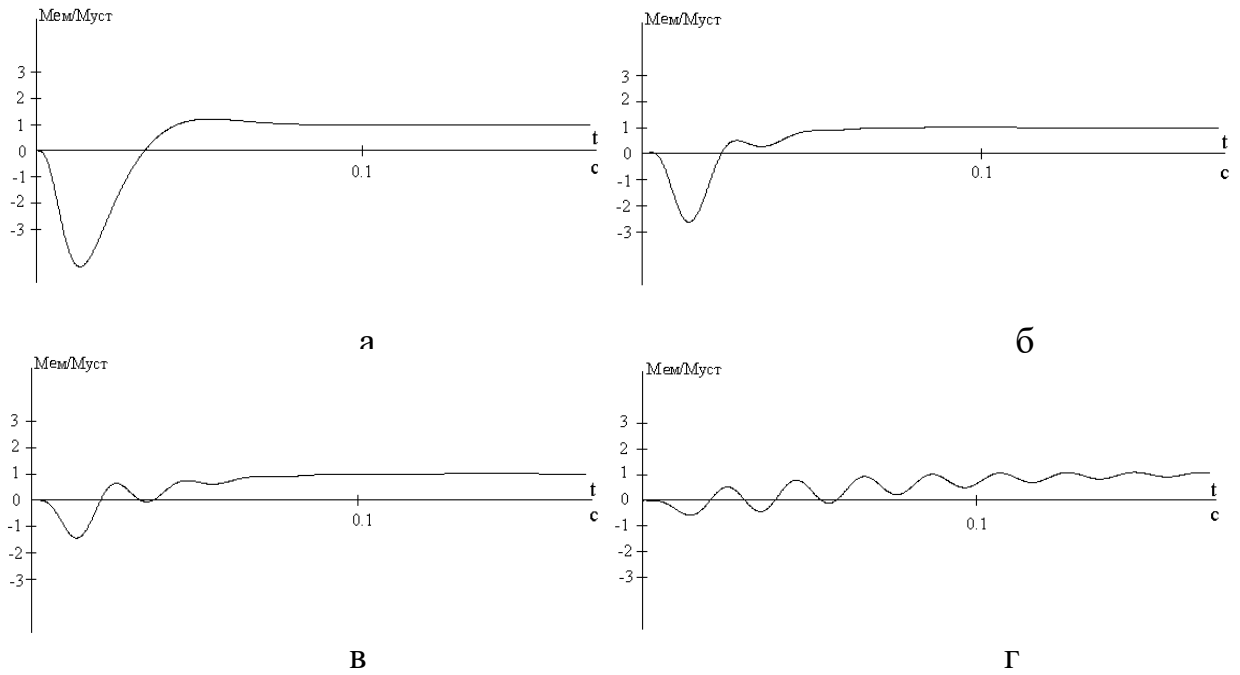


Рис.3.6. Графіки електромагнітних моментів двигунів: а – 4АМ100L4;
б – 6АМУ132М4; в – 4АМУ180М4; г – 4АМУ280М4

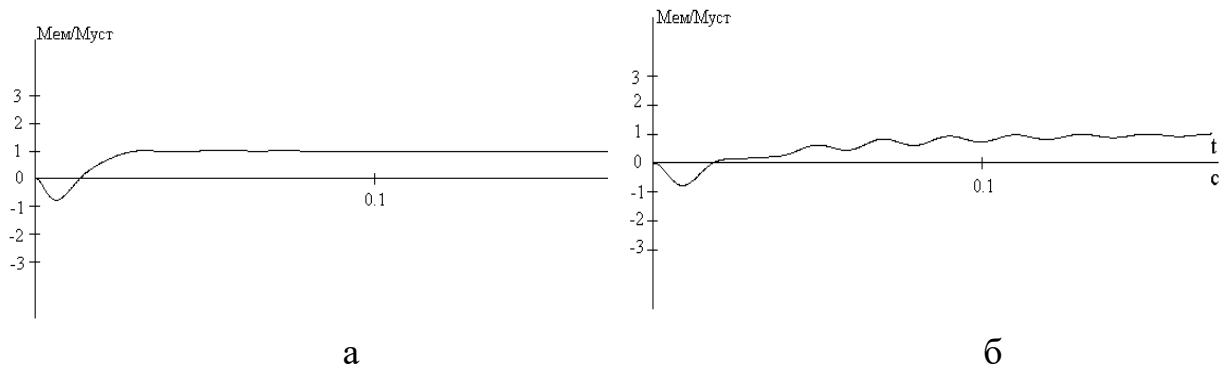


Рис.3.7. Графіки електромагнітних моментів двигунів при врахуванні
типових перехідних складових: а – 4АМУ100L4; б – 4АМУ280М4

$$\begin{aligned}
 H(p) &= p \cdot L \{ h(t) \} = p \cdot L \left\{ A_4 e^{-\frac{1}{T_4} t} \cos \Omega_4 t \right\} = p \cdot \frac{A_4 \left(p + \frac{1}{T_4} \right)}{\left(p + \frac{1}{T_4} \right)^2 + \Omega_4^2} = \\
 &= \frac{A_4 p^2 + \frac{A_4 p}{T_4}}{p^2 + \frac{2}{T_4} p + \left(\frac{1}{T_4^2} + \Omega_4^2 \right)}. \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

Передавальна функція ланки, що описує електромагнітну частину АД, з урахуванням усіх дев'яти складових

$$\begin{aligned}
 H_{\text{ем}}(p) = & A_1 + \frac{A_2 T_2 p}{T_2 p + 1} + \frac{A_3 T_3 p}{T_3 p + 1} + \frac{A_4 p^2 + \frac{A_4 p}{T_4}}{p^2 + \frac{2p}{T_4} + \left(\frac{1}{T_4^2} + \Omega_4^2\right)} + \frac{A_5 p^2 + \frac{A_5 p}{T_5}}{p^2 + \frac{2p}{T_5} + \left(\frac{1}{T_5^2} + \Omega_5^2\right)} + \\
 & + \frac{A_6 p^2 + \frac{A_6 p}{T_6}}{p^2 + \frac{2p}{T_6} + \left(\frac{1}{T_6^2} + \Omega_6^2\right)} + \frac{A_7 \Omega_7 p}{p^2 + \frac{2p}{T_7} + \left(\frac{1}{T_7^2} + \Omega_7^2\right)} + \frac{A_8 \Omega_8 p}{p^2 + \frac{2p}{T_8} + \left(\frac{1}{T_8^2} + \Omega_8^2\right)} + \\
 & + \frac{A_9 \Omega_9 p}{p^2 + \frac{2p}{T_9} + \left(\frac{1}{T_9^2} + \Omega_9^2\right)}, \tag{3.22}
 \end{aligned}$$

де A_i , T_i , ω_i – початкові значення амплітуд, постійних часу загасання та кутових частот вільних коливань складових перехідного моменту АД.

Передавальна функція розімкнутої системи асинхронного електроприводу з ТПН без урахування внутрішнього зворотного зв'язку має вигляд

$$H_p(p) = \frac{K_{\text{тп}} \cdot H_{\text{ем}}(p)}{J_{\Sigma} p}. \tag{3.23}$$

Передавальна функція системи з урахуванням внутрішнього позитивного зворотного зв'язку за кутом φ

$$H_3(p) = \frac{H_p(p)}{1 - H_p(p) \cdot K_{\varphi}}. \tag{3.24}$$

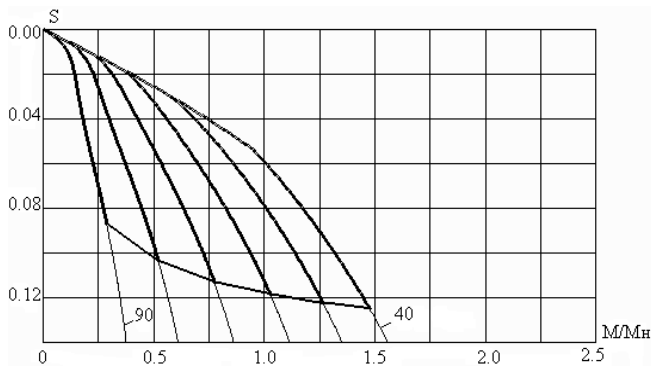
Після перетворень (3.24) формується характеристичне рівняння розімкнутої системи електроприводу ТПН-АД, яке має загальний вигляд

$$\begin{aligned}
 a_0 p^{13} + a_1 p^{12} + a_2 p^{11} + a_3 p^{10} + a_4 p^9 + a_5 p^8 + a_6 p^7 + a_7 p^6 + a_8 p^5 + a_9 p^4 + \\
 + a_{10} p^3 + a_{11} p^2 + a_{12} p + a_{13} = 0, \tag{3.25}
 \end{aligned}$$

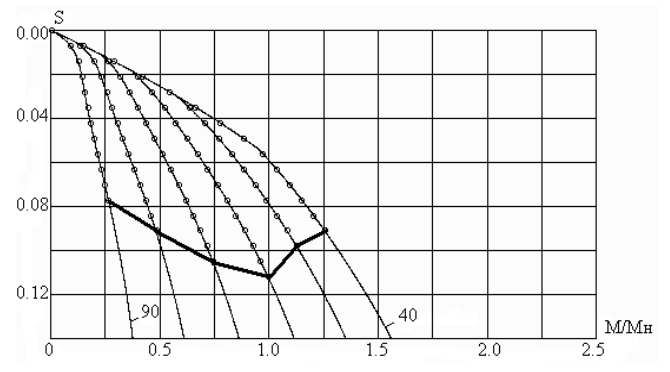
де $a_0 - a_{13}$ - коефіцієнти рівняння, що являють собою складні алгебраїчні вирази.

Аналіз стійкості ґрунтується на використанні алгебраїчного критерію Гурвіца з застосуванням програмних засобів. Результати дослідження ілюструє рис. 3.8 (а, в, д, ж), де представлено сімейства механічних характеристик для асинхронних двигунів серії АМУ потужностей від 4,0 до 132 кВт: 4АМ100L4; 6АМУ132М4; 4АМУ180М4; 4АМУ280М4. На механічних характеристиках позначені ділянки нестійкої роботи, знайдені на підставі розробленого розрахункового методу ($J_{\Sigma} = J_{\text{дв}}$, нульові ПЕМУ). Також, на рис. 3.8 (б, г, е, з) надані характеристики, розраховані за допомогою моделювання електропривода ТПН-АД при аналогічних умовах. Здійснювався пуск АД з заданим моментом навантаження і кутом управління ТПН. Після досягнення сталого режиму роботи виявляли наявність або відсутність автоколивань швидкості АД у кожній з точок характеристики. У ТПН-АД з СТ коливання відсутні для всіх розглянутих двигунів, що підтверджує попередні дослідження цього способу синхронізації [32]. Деякі розбіжності в результатах аналізу стійкості за різними методами та критеріями можна пояснити

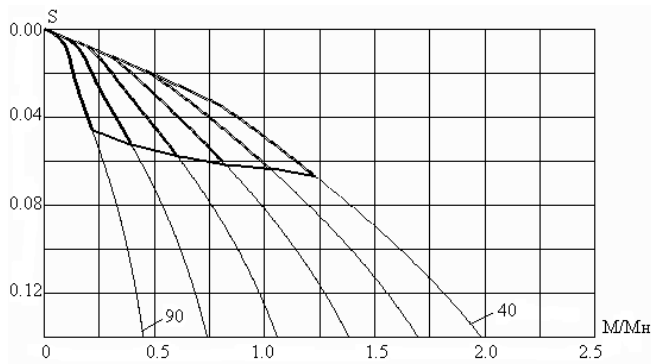
- неможливістю повного врахування нелінійних властивостей у динамічних режимах роботи ЕП;
- наявністю залежності сталих автоколивань від початкових умов. Наприклад, на рис. 3.9,а наведені графіки перехідних процесів швидкості й моменту двигуна 4АМУ132М4 з ТПН під час пуску з параметрами: $\alpha = 70$ ел. град., $M_c = 0,5M_n$, $J_{\Sigma} = J_{\text{дв}}$. Коливання відсутні. Рисунок 3.9,б ілюструє пуск АД вхолосту за тих самих умов і подальше через інтервал часу накидання навантаження, яке визначається моментом $M_c = 0,5M_n$. Спостерігаються характерні великі коливання;
- неминучими похибками під час математичного опису та моделювання процесів (функціональної ідентифікації вихідної напруги ТПН, чисельних рішень визначників високого порядку тощо);
- відносною складністю пошуку зони нестійкої роботи ТПН-АД за допомогою експерименту на моделі.



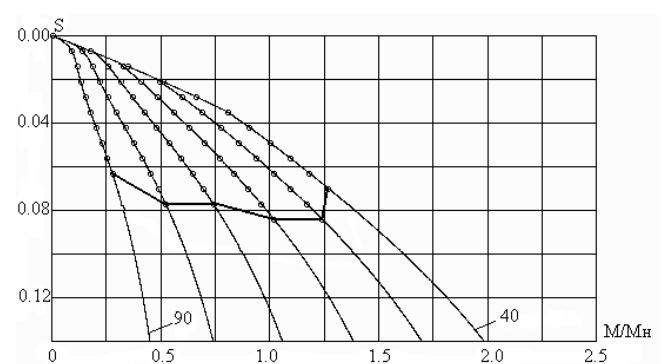
а



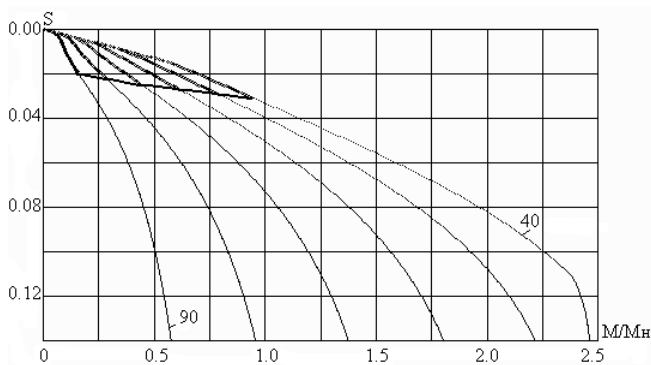
б



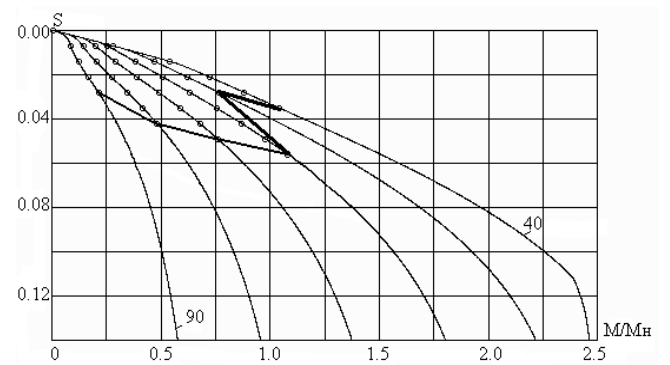
в



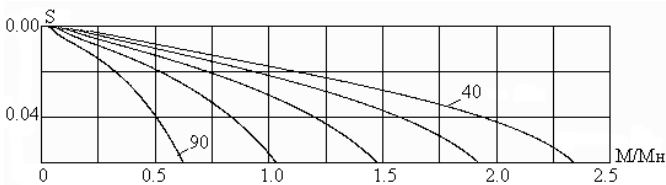
г



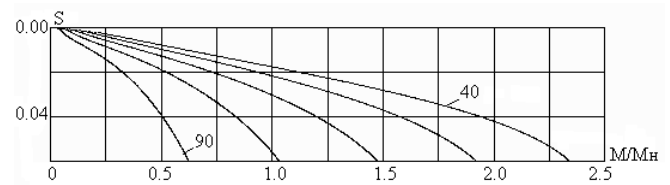
д



е



ж



з

Рис.3.8. Механічні характеристики ТПН-АД з визначеними зонами нестійкої роботи за розрахунковим методом (а, в, д, ж) і за допомогою моделювання (б, г, е, з), за умовами $40 < \alpha < 90$ ел. град. для двигунів: а,б - 4АМУ90L4; в,г - 6АМУ100L4; д,е - 6АМУ132M4; ж,з - 4АМУ280M4

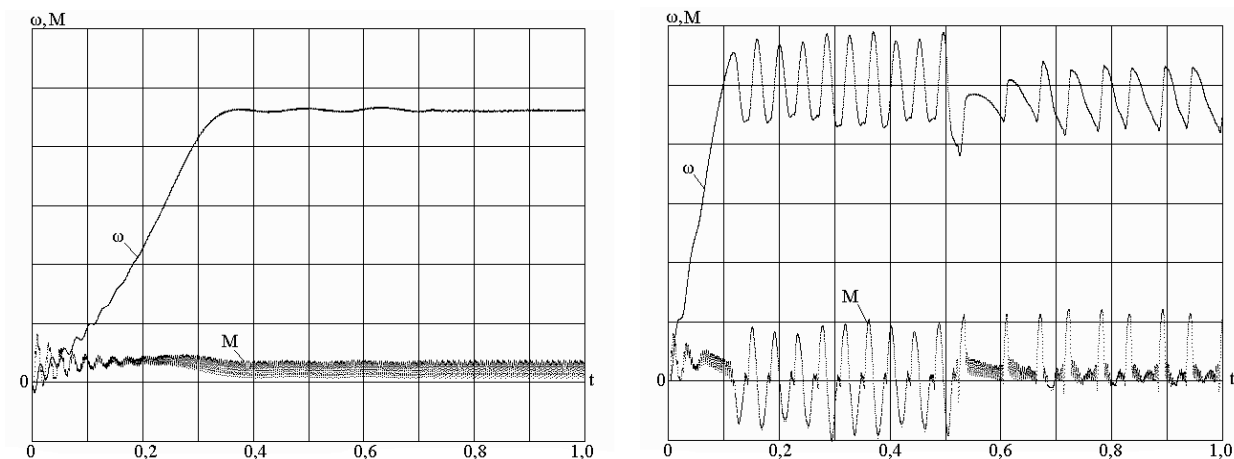


Рис. 3.9. Графіки перехідних процесів швидкості та моменту двигуна 6АМУ132М4, 11 кВт, при живленні від ТПН з СН: а – пуск під навантаженням, б – пуск вхолосту і накидання навантаження. Параметри: $\alpha = 60$ ел. град.; $M_c = 0,5M_n$; $J_\Sigma = J_{дв}$. Масштаби: $m_M = 2M_n/\text{дел.}$; $m_\omega = 0,2\omega_0/\text{дел.}$

3.3. Оцінка впливу на стійкість параметрів електроприводу

Як показують результати досліджень, в асинхронних двигунах, які регулюються ТПН з СН, від власних параметрів ЕП залежить як характер коливань, так й сама їх наявність. Це визначає завдання – оцінити динамічні властивості і вплив параметрів асинхронних двигунів на стійкість електроприводу ТПН-АД на підставі розрахункового методу та результатів моделювання.

Розглянемо сімейство чотириполосних електродвигунів серії 4АМУ звичайного виконання потужністю 2,2 - 132 кВт. Відомо, що при збільшенні сумарного моменту інерції системи область стійкої роботи збільшується і навпаки. Для двигуна 4А280М4, 132 кВт, не вдалося виявити жодної точки, де існують автоколивання, що показано на рис. 3.8,з. Зі зменшенням потужностей АД, і, як наслідок, моментів інерції, з'являється і збільшується зона нестійкої роботи (рис. 3.8,г, 3.8,е). Це спостерігається для чотириполосних електродвигунів серії 4АМУ з потужністю від 4,0 кВт (рис.3.8,б) і більше. Водночас в ТПН-АД з двигунами потужністю менше ніж 4,0 кВт спостерігається

зворотна картина – зона нестійкої роботи зменшується зі зменшенням потужностей АД.

Ці результати можуть бути пояснені тим, що стійкість системи визначається не абсолютним значенням сумарного моменту інерції, а впливом його відносної величини на характер перехідного процесу АД. Цей вплив може бути виражений відношенням електромеханічної постійної часу T_m до електромагнітної постійної часу четвертої перехідної складової електромагнітного моменту – T_4 (3.10). Під час лінеаризації механічної характеристики в області $0 < s < s_H$

$$T_m = J_\Sigma \frac{1}{|\beta|} \approx J_\Sigma \frac{\Delta\omega_H}{\Delta M_H} \approx J_\Sigma \frac{\omega_0(1-s_H)}{M_H}, \quad (3.26)$$

де J_Σ – сумарний наведений момент інерції, кг·м².

У табл. 3.2 приведені значення T_m , T_4 і їх відношення (T_m/T_4) для сімейства асинхронних двигунів досліджуваної серії АМУ.

Таблиця 3.2

Параметри постійних часу та їх відношень для деяких чотириполюсних асинхронних двигунів серії АМУ

№	Типорозмір	Номінальні потужності, кВт	T_m , с	T_4 , с	T_m/T_4
1	4АМУ280М4	132	0,446	0,0464	9,61
2	4АМУ250S4	75	0,32	0,0452	7,08
3	4АМУ200L4	45	0,24	0,0418	5,74
4	4АМУ180М4	30	0,182	0,0336	5,42
5	6АМУ132М4	11	0,089	0,0214	4,15
6	6АМУ132S4	7,5	0,087	0,0217	4,01
7	4АМУ100L4	4	0,062	0,0174	3,56
8	4АМУ100S4	3,0	0,054	0,0133	4,06
9	4АМУ90L4	2,2	0,046	0,0124	4,85

Результати аналізу показують, що існує зв'язок між значеннями відношення і величиною зон нестійкої роботи. Чим більше відношення, тим менша ймовірність виникнення автоколивань розімкнутої системи ТПН-АД, при

застосуванні даних типів двигунів. Однак це не дає право стверджувати, що за досить близьких або однакових значень відношень для деяких типів двигунів (наприклад, 4АМУ100S4 і 6АМУ132М4) зони нестійкої роботи будуть ідентичні [33].

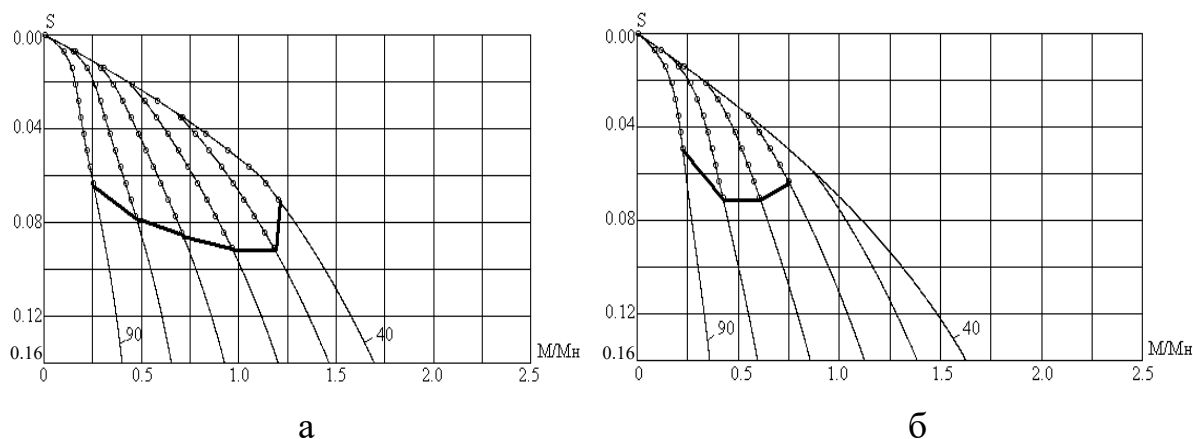


Рис.3.10. Механічні характеристики ТПН-АД із зазначенням зон нестійкої роботи: а – 4АМУ100S4, 3,0 кВт; б – 4АМУ90L4, 2,2 кВт.

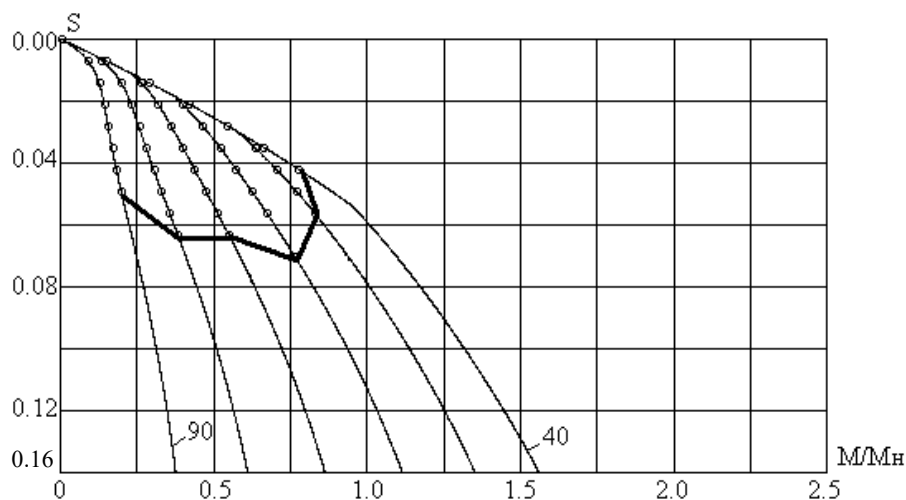


Рис. 3.11. Механічні характеристики АД 4АМУ100S4 з зазначенням зони нестійкої роботи з сумарним моментом інерції $J_{\Sigma} = 2 J_{дв}$

Можливий приклад зворотного аналізу, коли відношення змінюється не завдяки зміні потужності двигуна, а завдяки зміні сумарного моменту інерції електропривода в разі застосування одного й того самого АД. Наприклад, у разі застосування двигуна 4АМУ100S4 із сумарним моментом інерції електроприводу $J_{\Sigma} = 2J_{дв}$, відношення збільшується до 8,12, при цьому, і область

нестійкої роботи істотно зменшується. Це ілюструють механічні характеристики АД, наведені на рис.3.10,а і рис.3.11. Наведені викладки було виконано і підтверджено для низки сімейств асинхронних двигунів серії АМУ (IP44, IP23) з числом пар полюсів $p = 2,3,4$.

3.4. Обмеження коливальних процесів

Значне обмеження виникнення нестійких режимів роботи ТПН-АД можливо у разі застосування принципово нового способу керування перетворювачем, за якого задана вихідна напруга забезпечується незалежно від фази струму навантаження. Завдання можна сформулювати так: система імпульсно-фазового керування має забезпечити пропорційну залежність між напругою керування U_y і вихідною напругою перетворювача, при цьому дія внутрішнього зворотного зв'язку автоматично компенсується відповідними змінами поточного кута керування α .

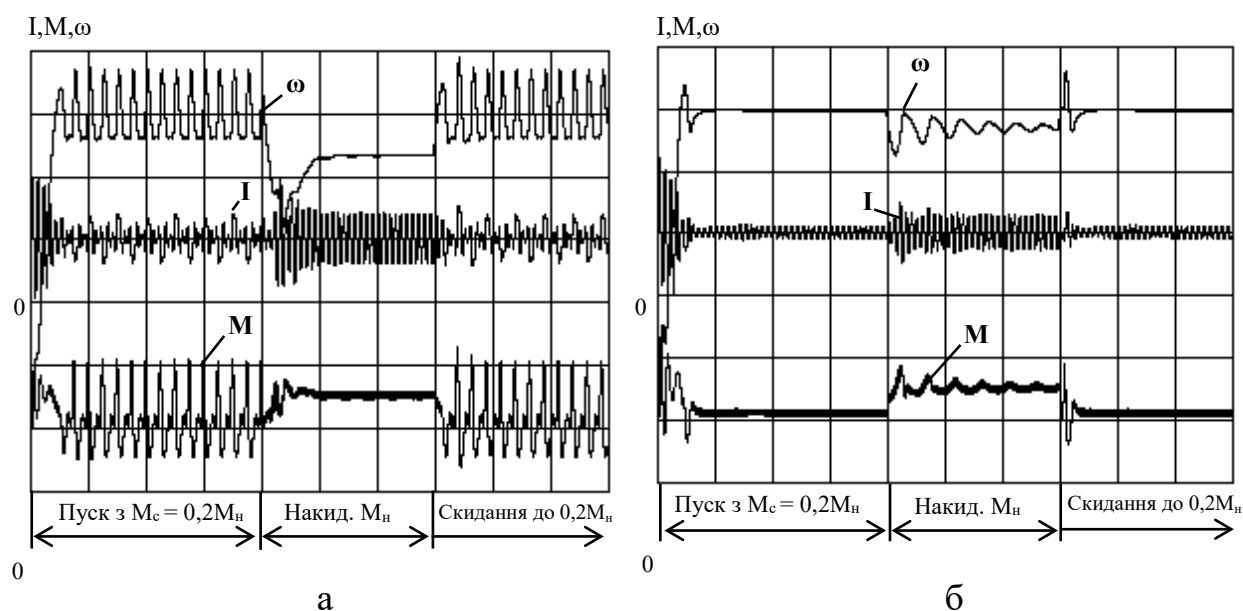


Рис. 3.12 – Осцилограми процесу пуску і накидання – скидання навантаження АД 4АМУ100L4, 4 кВт, $J_{\Sigma} = 1,5 J_{дв}$; а – керуючий вплив $\alpha = 60$ ел. град; б – керуючий вплив $U_1 = 0,85U_H$. Масштаби: $m_t = 0,2с/дел.$; $m_M = 2M_H/дел.$; $m_{\omega} = 0,2\omega_0/дел.$

Це можливо, якщо використовувати відому наближену аналітичну залежність $U_{1\text{ТПН}} = f(\alpha, \varphi_e)$ [34]. Цю залежність необхідно перетворити до вигляду $\alpha = f(U_{1\text{ТПН}}, \varphi_e)$, де керувальною дією стає напруга $U_{1\text{ТПН}}$, збурювальною, як і раніше, залишається кут φ_e , а кут увімкнення вентилів α автоматично обчислюється для підтримання заданої напруги незалежно від поточної фази струму статора асинхронного двигуна.

$$\alpha = \frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_2(A_0 - U_{1\text{ТПН}})}}{2A_2}, \quad (3.27)$$

$$\text{де } A_0 = -0.1291 + 0.06165\varphi_e - 7.2407\text{E-}04\varphi_e^2,$$

$$A_1 = 0.02723 - 0.0015212\varphi_e + 2.038\text{E-}05\varphi_e^2,$$

$$A_2 = -2.1534\text{E-}04 + 8.2836\text{E-}06\varphi_e - 1.1941\text{E-}07\varphi_e^2.$$

На рис. 3.12 приведені дві осцилограми процесів пуску, накидання і скидання навантаження під час керування за керуючим впливом $\alpha = \text{const}$ (а) і $U_{1\text{ТПН}} = \text{const}$ (б). У першому випадку (3.12,а) після закінчення процесу пуску виникають описані незатухаючі коливання АД, під час скидання навантаження $M_c = M_n$ коливання загасають, проте процес скидання супроводжується провалом швидкості на 35 %. Під час скидання навантаження знову виникають коливання. У другому випадку (3.12,б) незатухаючі коливання не виникають, а провал швидкості під час накидання навантаження істотно зменшується до 15 % [35].

РОЗДІЛ 4

НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ ТА АЛГОРИТМИ СИМЕТРУВАННЯ ТПН-АД

4.1. Математичний опис трифазних несиметричних систем

У процесі роботи електроприводів можливі несиметричні режими, що виникають як результат впливу несиметрії напруги джерела живлення. Ці режими призводять до зміни статичних, динамічних та енергетичних характеристик електромеханічних систем. Під час дослідження властивостей ЕП передбачається, що

- параметри АД, СІФК і ТПН є симетричними;
- обмотки двигуна з'єднані у зірку без нульового проводу;
- показники якості джерела живлення, виключаючи несиметрію напруги, відповідають нормам і не впливають на роботу ЕП.

Аналіз несиметричних режимів у трифазних електричних колах передбачає застосування методу симетричних складових. Він заснований на поданні трифазної несиметричної системи у вигляді суми трьох симетричних величин – симетричних складових цієї системи. Складові характеризуються різними послідовностями чергування фаз [36]:

- системи прямої послідовності;
- системи зворотної послідовності;
- системи нульової послідовності.

Зв'язок величин несиметричної системи і симетричних складових визначається на підставі рівнянь (4.1) і (4.2).

$$\left. \begin{aligned} \vec{G}_0 &= (\vec{G}_a + \vec{G}_b + \vec{G}_c)/3, \\ \vec{G}_1 &= (\vec{G}_a + a\vec{G}_b + a^2\vec{G}_c)/3, \\ \vec{G}_2 &= (\vec{G}_a + a^2\vec{G}_b + a\vec{G}_c)/3. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{G}_a &= \vec{G}_0 + \vec{G}_1 + \vec{G}_2, \\ \vec{G}_b &= \vec{G}_0 + a^2 \vec{G}_1 + a \vec{G}_2, \\ \vec{G}_c &= \vec{G}_0 + a \vec{G}_1 + a^2 \vec{G}_2; \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

де \vec{G} – вектор розглянутої змінної (\vec{U}, \vec{I});

$a = e^{j2\pi/3}$ – фазний множник (оператор повороту).

Несиметрія напруги трифазного ДЖ характеризується коефіцієнтом несиметрії напруги – K_u , який так само відомий у літературі, як коефіцієнт зворотної послідовності напруги [14]. Він визначається відношенням напруги зворотної послідовності до номінальної напруги і виражається у відсотках.

$$K_u = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}} \cdot 100. \quad (4.3)$$

Відносне значення напруги нульової послідовності виражається коефіцієнтом нульової послідовності напруги K_{u0} , %, і визначається відношенням напруги нульової послідовності основної частоти до номінальної фазної напруги

$$K_{u0} = \frac{U_0}{U_{\text{ном ф}}} \cdot 100. \quad (4.4)$$

Система, яка не має складової нульової послідовності, є врівноваженою. За аналогією з напругою джерела живлення, трифазну систему фазних струмів АД можливо розкласти на системи прямої, зворотної та нульової послідовності, а також охарактеризувати коефіцієнтами

$$K_i = \frac{I_2}{I_1}, \quad (4.5)$$

$$K_{i0} = \frac{I_0}{I_1}, \quad (4.6)$$

де I_1 – струм системи прямої послідовності, А.

4.2. Методологія дослідження несиметричних режимів роботи

4.2.1 Умови формування та розрахунків коефіцієнтів несиметрії напруги джерела живлення. Дослідження ЕП при несиметрії системи напруг ДЖ проводиться за допомогою моделювання. Функціональна схема моделі розімкнутої системи ТПН-АД, що дає змогу оцінити вплив параметрів і режимів роботи ЕП на коефіцієнт несиметрії струмів АД, зображена на рис. 4.1 [37].

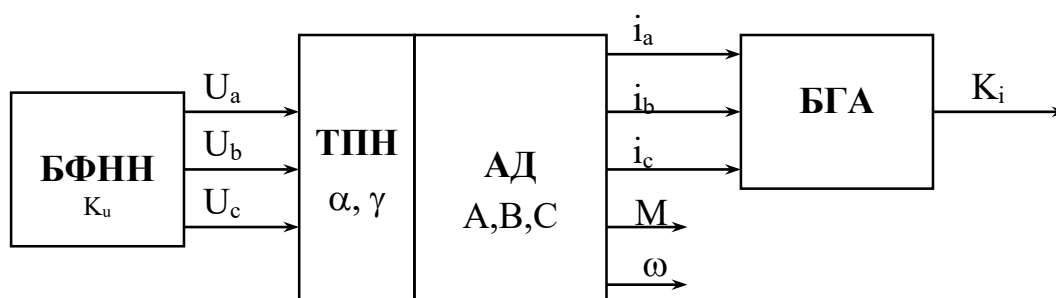


Рис. 4.1. Функціональна схема моделі розімкнутої системи ТПН-АД

Схема містить: БФНН – блок формування несиметричної напруги джерела живлення із заданим коефіцієнтом несиметрії K_u ; ТПН – модель тиристорного перетворювача напруги із синхронізацією з напругою мережі (α) та зі струмом навантаження (γ); АД – модель асинхронного двигуна в координатах А, В, С; БГА – блок гармонічного аналізу струмів статора асинхронного двигуна.

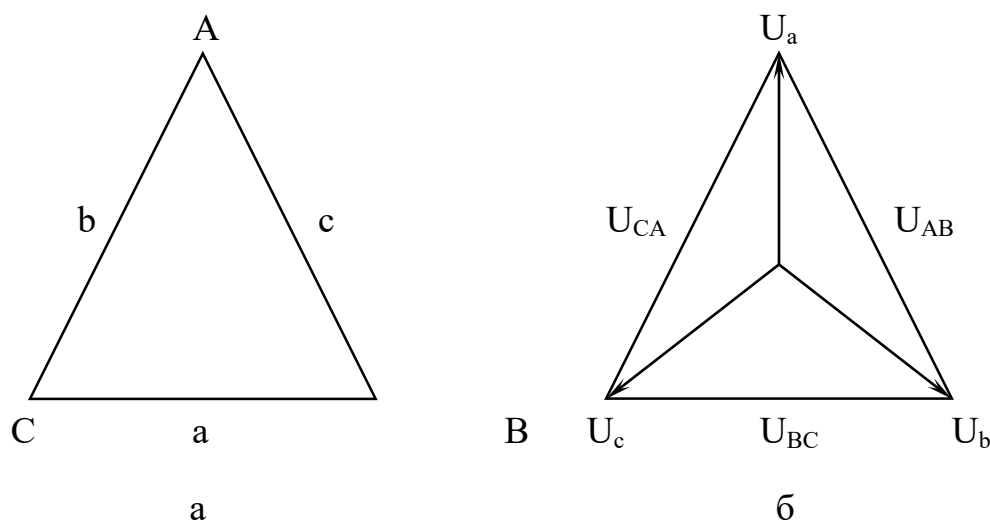


Рис. 4.2. Допоміжний трикутник - а та трикутник напруг - б

Відповідно до трикутника лінійної напруги, показаному на рис. 4.2, де А, В, С – вершини і а, b, с – сторони трикутника, згідно з теоремою косинусів [21]

$$\left. \begin{aligned} \cos A &= \frac{(b^2 + c^2 - a^2)}{2bc} = \frac{(U_{CA}^2 + U_{AB}^2 - U_{BC}^2)}{2U_{CA}U_{AB}}, \\ \cos B &= \frac{(a^2 + c^2 - b^2)}{2ac} = \frac{(U_{BC}^2 + U_{AB}^2 - U_{CA}^2)}{2U_{BC}U_{AB}}, \\ \cos C &= \frac{(a^2 + b^2 - c^2)}{2ab} = \frac{(U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - U_{AB}^2)}{2U_{BC}U_{CA}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

При відомих значеннях лінійних напруг джерела живлення ($U_{AB} = c$, $U_{BC} = a$, $U_{CA} = b$) за виразами (4.8) - (4.9) можна визначати фазні напруги (U_a , U_b , U_c) та напруги прямої (U_1) та зворотної (U_2) послідовностей

$$\left. \begin{aligned} U_a &= \frac{2}{3} \sqrt{c^2 + \frac{a^2}{4} - a \cdot c \cdot \cos B} = \frac{2}{3} \sqrt{U_{AB}^2 + \frac{U_{BC}^2}{4} - U_{BC}U_{AB} \cos B}, \\ U_b &= \frac{2}{3} \sqrt{a^2 + \frac{b^2}{4} - a \cdot b \cdot \cos C} = \frac{2}{3} \sqrt{U_{BC}^2 + \frac{U_{CA}^2}{4} - U_{BC}U_{CA} \cos C}, \\ U_c &= \frac{2}{3} \sqrt{b^2 + \frac{c^2}{4} - b \cdot c \cdot \cos A} = \frac{2}{3} \sqrt{U_{CA}^2 + \frac{U_{AB}^2}{4} - U_{CA}U_{AB} \cos A}. \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{\sqrt{(a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos(B + \pi/3))}}{3} = \frac{\sqrt{(U_{BC}^2 + U_{AB}^2 - 2U_{BC}U_{AB} \cdot \cos(B + \pi/3))}}{3}, \\ U_2 &= \frac{\sqrt{(a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos(B - \pi/3))}}{3} = \frac{\sqrt{(U_{BC}^2 + U_{AB}^2 - 2U_{BC}U_{AB} \cdot \cos(B - \pi/3))}}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

При несиметрії напруги ДЖ, яке підводиться до ЕП, система фазних напруг у загальному вигляді може бути виражена

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \sqrt{2}U_a \sin(\omega_0 t + \varphi_{fa}), \\ u_b &= \sqrt{2}U_b \sin(\omega_0 t + \varphi_{fa} + \varphi_{fb}), \\ u_c &= \sqrt{2}U_c \sin(\omega_0 t + \varphi_{fa} + \varphi_{fc}), \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

де φ_{fa} – фазовий кут зсуву вектора; φ_{fb} – фазовий кут зсуву, на який вектор випереджає; φ_{fc} – фазовий кут зсуву, на який вектор випереджає вектор. Якщо умовно прийняти, що фаза вектора напруги U_a дорівнює нулю (рис.4.3), то кути зсуву фаз між векторами фазної напруги (φ_{fb} , φ_{fc}) щодо фази А, а також лінійних (φ_{L1} , φ_{L2} , φ_{L3}) напруг визначаються на підставі виразів (4.11) - (4.13).

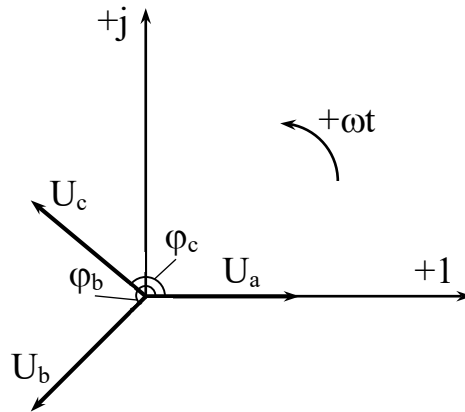


Рис.4.3. Векторна діаграма фазних напруг із зазначенням прийнятих кутів зсуву фаз

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{fc} &= \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left(\frac{k_1}{\sqrt{1-k_1^2}} \right), \\ \varphi_{fb} &= \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left(\frac{k_2}{\sqrt{1-k_2^2}} \right) + \varphi_{fc}. \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{L1} &= \pi - \angle B, \\ \varphi_{L2} &= \pi - \angle C, \\ \varphi_{L3} &= \pi - \angle A. \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

де k_1, k_2 – розрахункові коефіцієнти,

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{U_c^2 + U_a^2 - U_{CA}^2}{2U_a U_b}, \\ k_2 &= \frac{U_b^2 + U_c^2 - U_{BC}^2}{2U_b U_c}. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

У процесі моделювання блока формування несиметричної напруги ДЖ виникає проблема, пов'язана з неоднозначною залежністю лінійних напруг і коефіцієнтів несиметрії напруги K_u . Одному поєднанню значень лінійних напруг відповідає тільки одне значення коефіцієнта K_u , однак, заданому значенню коефіцієнта несиметрії відповідає безліч поєднань лінійних напруг. Для розв'язання цієї проблеми пропонується розглядати варіант несиметрії, за якому одна з лінійних напруг (U_{BC}) не змінюється та дорівнює номінальній величині, тоді як дві інші (U_{CA} , U_{AB}) рівні між собою та змінюються [38]. Водночас передбачається, що властивості двигуна при заданому K_u будуть однакові, незалежно від того, яким способом формується несиметрія. На рис. 4.4 зображена залежність коефіцієнта несиметрії напруги K_u від відносних значень лінійних напруг $U^*_{CA} = U^*_{AB}$.

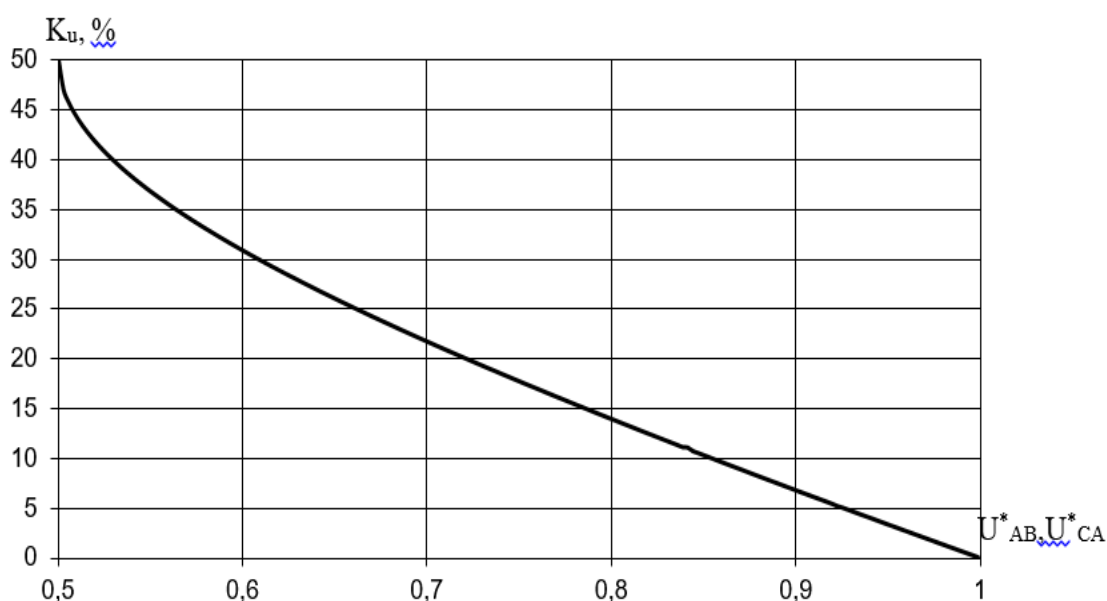


Рис. 4.4. Залежність коефіцієнта несиметрії напруги від відносних значень лінійних напруг $U^*_{CA} = U^*_{AB}$

Цей рисунок дає змогу планувати діапазон коефіцієнта K_u , прийнятий для дослідження, залежно від можливих змін напруги ДЖ. Результати формування лінійних несиметричних напруг з деякими коефіцієнтами несиметрії приведені в табл. 4.1, там же приведені результати розрахунку фазних напруг, кутів зсуву фаз, складових прямої та зворотної послідовностей у відносних і абсолютних одиницях.

Таблиця 4.1

Значення параметрів при несиметричних умовах роботи ЕП

Параметр	$K_u = 0$	$K_u = 5\%$	$K_u = 10\%$	$K_u = 15\%$	$K_u = 20\%$
$U_{AB}, \text{в.о./В}$	1,0/ 381,051	0,9260/ 352,858	0,8544/ 325,570	0,7858/ 299,434	0,7211/ 274,779
$U_{BC}, \text{в.о./В}$	1,0/ 381,051	1,0/ 381,051	1,0/ 381,051	1,0/ 381,051	1,0/ 381,051
$U_{CA}, \text{в.о./В}$	1,0/ 381,051	0,9260/ 352,858	0,8544/ 325,570	0,7858/ 299,434	0,7211/ 274,779
$U_a, \text{в.о./В}$	1,0/220	0,9000/ 198,000	0,8000/ 176,000	0,7000/ 154,000	0,6000/ 132,000
$U_b, \text{в.о./В}$	1,0/220	0,9759/ 214,698	0,9539/ 209,858	0,9341/ 205,502	0,9165/ 210,342
$U_c, \text{в.о./В}$	1,0/220	0,9759/ 214,698	0,9539/ 209,858	0,9341/ 205,502	0,9165/ 210,342
$\varphi_a, \text{рад/ел. град.}$	0	0	0	0	0
$\varphi_b, \text{рад/ел. град.}$	4,1888/ 240,122	4,2332/ 242,665	4,2797/ 245,333	4,3283/ 248,119	4,3789/ 251,021
$\varphi_c, \text{рад/ел. град.}$	2,0944/ 120,061	2,0500/ 117,517	2,0035/ 114,849	1,9549/ 112,063	1,9043/ 109,162
$U_1, \text{в.о.}$	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80
$U_2, \text{в.о.}$	0	0,05	0,10	0,15	0,20

4.2.2. Гармонійний аналіз струмів статора асинхронного двигуна. Під час дослідження впливу несиметрії напруги ДЖ на ТПН-АД виникає необхідність урахування несинусоїдальності форми струмів двигуна, зумовленої впливом перетворювача (рис. 4.5). Це змушує застосовувати в моделі блок гармонійного аналізу струмів статора – БГА (рис. 4.1). Принцип, покладений в основі БГА зводиться до того, що розрахунок несиметрії струмів з урахуванням їх несинусоїдальної форми можна провести, визначивши вектори першої гармоніки прямої та зворотної складових струмів. Для цього необхідно знайти коефіцієнти ряду Фур'є з рівності [21]

$$\int_0^{2\pi} i_{\xi}(\omega t) d(\omega t) = \int_a^{2\pi+a} i_{\xi}(\omega t) d(\omega t) = 0, \quad (4.14)$$

де x – індекс фази статора АД, в.о.;

a – дійсне число, в.о.

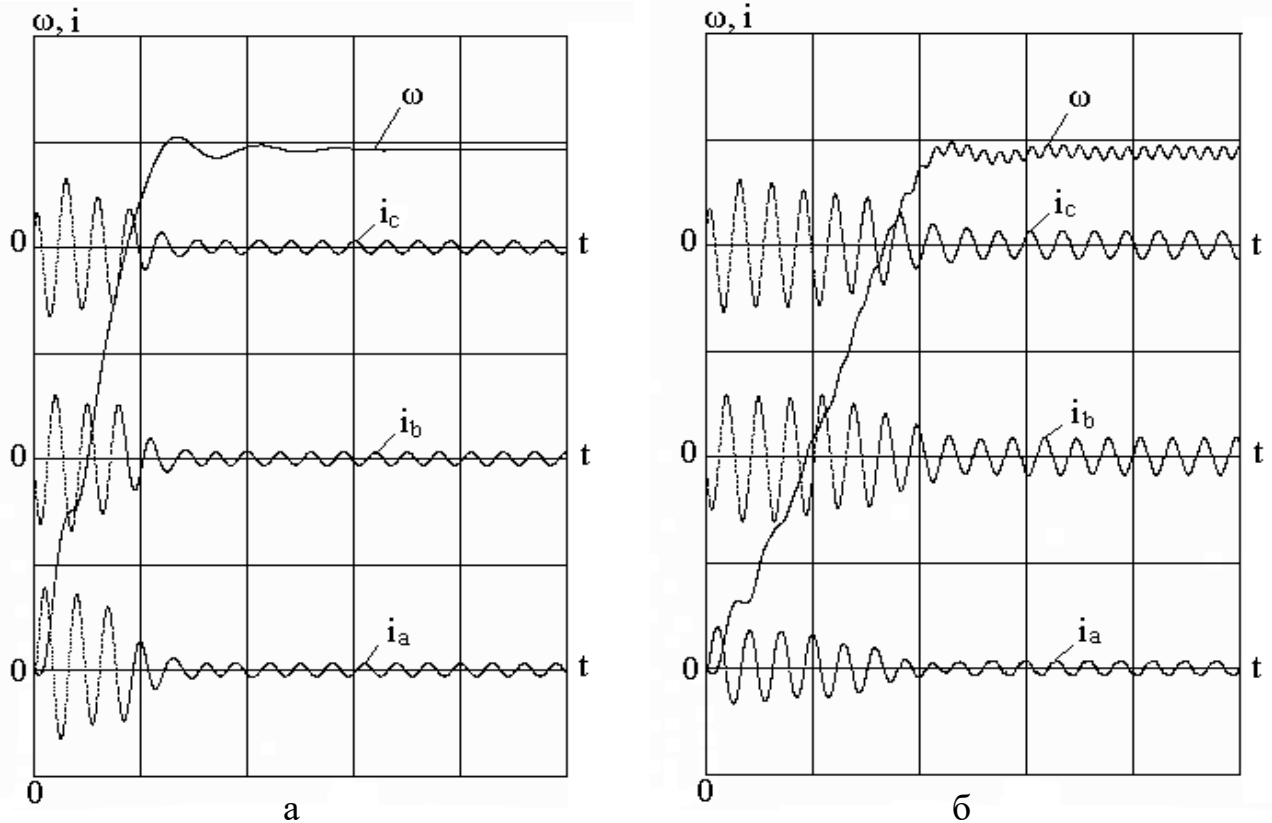


Рис. 4.5. Графіки швидкості і струмів статора АД 4АМУ90L4 при живленні від ТПН з СН під час пуску в: а – симетричному режимі ($K_u = 0$; $J_\Sigma = 2J_{дв}$, $M_c = 0,25M_H$, $\alpha = 40$ ел. град.); б – несиметричному режимі ($K_u = 20\%$; $J_\Sigma = 2J_{дв}$, $M_c = 0,25M_H$, $\alpha = 40$ ел. град.). Масштаби: $m_i = 6I_H/\text{діл.}$, $m_\omega = 0,2\omega_0/\text{діл.}$, $m_t = 0,06\text{с}/\text{діл.}$

Коефіцієнти ряду Фур'є першої гармоніки струмів АД визначаються [21].

$$\left. \begin{aligned} a_{1\xi} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_\xi(T) \cos(T) d(T) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{ih}{(i-1)h} \int_{(i-1)h}^{ih} i_\xi(T) \cos(T) d(T), \\ b_{1\xi} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_\xi(T) \sin(T) d(T) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{ih}{(i-1)h} \int_{(i-1)h}^{ih} i_\xi(T) \sin(T) d(T). \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

де h – крок розрахунку, в.о.;

N – загальна кількість розрахункових значень, в.о.

За допомогою методу трапеції – чисельного методу розв'язання визначених інтегралів, можливий перехід

$$\left. \begin{aligned} a_{1\xi} &= \sum_{i=1}^N \frac{i_\xi(T_i) \cos(T_i) + i_\xi(T_{i-1}) \cos(T_i - h)}{N}, \\ b_{1\xi} &= \sum_{i=1}^N \frac{i_\xi(T_i) \sin(T_i) + i_\xi(T_{i-1}) \sin(T_i - h)}{N}. \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Модулі першої гармоніки струмів статора АД визначаються через відомі коефіцієнти ряду Фур'є [38]

$$I_{1m\xi} = \sqrt{a_{1\xi}^2 + b_{1\xi}^2}, \quad (4.17)$$

Початкові фази при врахуванні початкових умов розрахунку визначаються за логічними рівняннями

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \pi/2, \quad \forall (a_{1n} > 0) \& (b_{1n} = 0), \\ \psi &= -\pi/2 + 2\pi, \quad \forall (a_{1n} < 0) \& (b_{1n} = 0), \\ \psi &= \arctg\left(a_{1n}/b_{1n}\right), \quad \forall (a_{1n} \geq 0) \& (b_{1n} > 0), \\ \psi &= \arctg\left(a_{1n}/b_{1n}\right) + 2\pi, \quad \forall (a_{1n} < 0) \& (b_{1n} > 0), \\ \psi &= -\pi/2 + 2\pi, \quad \forall (a_{1n} < 0) \& (b_{1n} = 0), \\ \psi &= \arctg\left(a_{1n}/b_{1n}\right) + \pi, \quad \forall b_{1n} < 0. \end{aligned} \right\} (4.18)$$

Якщо припустити, що вектор збігається з дійсною віссю координатної системи, то, за аналогією з векторною системою напруг (рис. 4.3), можна записати

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_{1A} &= \vec{I}_{1mA}, \\ \vec{I}_{1B} &= \vec{I}_{1mB} e^{j\varphi_2}, \\ \vec{I}_{1C} &= \vec{I}_{1mC} e^{j\varphi_3}, \end{aligned} \right\} (4.19)$$

де $\varphi_2 = \psi_{1B} - \psi_{1A}$ – кут зсуву між векторами \vec{I}_{1A} і \vec{I}_{1B} , рад;

$\varphi_3 = \psi_{1C} - \psi_{1A}$ – кут зсуву між векторами \vec{I}_{1A} і \vec{I}_{1C} , рад.

Використовуючи векторні вирази, складових прямої та зворотної послідовностей струмів першої гармоніки визначаються [5]

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_{11} &= \left(\vec{I}_{1A} + a\vec{I}_{1B} + a^2\vec{I}_{1C} \right) / 3, \\ \vec{I}_{12} &= \left(\vec{I}_{1A} + a^2\vec{I}_{1B} + a\vec{I}_{1C} \right) / 3. \end{aligned} \right\} (4.20)$$

Модулі векторів прямої та зворотної послідовностей струмів першої гармоніки визначаються за їхніми проекціями на вісь дійсних і уявних чисел

$$\left. \begin{aligned} I_{11} &= \sqrt{[\operatorname{Re}(\tilde{I}_{11})]^2 + [\operatorname{Im}(\tilde{I}_{11})]^2}, \\ I_{12} &= \sqrt{[\operatorname{Re}(\tilde{I}_{12})]^2 + [\operatorname{Im}(\tilde{I}_{12})]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

Проекції визначаються з виразу (4.20)

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\tilde{I}_{11}) &= [I_{1mA} + I_{1mB} \cos(\varphi_2 + 2\pi/3) + I_{1mC} \cos(\varphi_3 + 4\pi/3)]/3, \\ \operatorname{Im}(\tilde{I}_{11}) &= [I_{1mB} \sin(\varphi_2 + 2\pi/3) + I_{1mC} \sin(\varphi_3 + 4\pi/3)]/3, \\ \operatorname{Re}(\tilde{I}_{12}) &= [I_{1mA} + I_{1mB} \cos(\varphi_2 + 4\pi/3) + I_{1mC} \cos(\varphi_3 + 2\pi/3)]/3, \\ \operatorname{Im}(\tilde{I}_{12}) &= [I_{1mB} \cos(\varphi_2 + 4\pi/3) + I_{1mC} \cos(\varphi_3 + 2\pi/3)]/3. \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

Таким чином, коефіцієнти несиметрії першої гармоніки струмів асинхронного двигуна визначаються на підставі залежності

$$K_i = \frac{I_{12}}{I_{11}} = \frac{\sqrt{[\operatorname{Re}(\tilde{I}_{12})]^2 + [\operatorname{Im}(\tilde{I}_{12})]^2}}{\sqrt{[\operatorname{Re}(\tilde{I}_{11})]^2 + [\operatorname{Im}(\tilde{I}_{11})]^2}}. \quad (4.23)$$

4.3. Результати дослідження несиметричних режимів роботи

Як об'єкт дослідження використовується двигун 4АМУ90L4 при живленні від ТПН, параметри якого наведено в табл. 4.2. Це дає можливість на прикладі одного з АД оцінити вплив різних параметрів ЕП і режимів роботи на несиметрію струмів.

Таблиця 4.2

Параметри асинхронного електродвигуна 4АМУ90L4

Типорозмір	n, об/хв	P _{2н} , кВт	η _н , %	cosφ _н , %	Пускові показники						
					m _п	m _м	m _к	S _н , %	S _к , %	i _п	J _д , кг·м ²
4АМУ90L4	1500	2,2	81,5	80	2,2	1,5	2,8	6,5	35	6,0	0,0056

У процесі дослідження ТПН-АД може виникнути проблема, пов'язана з неможливістю визначення коефіцієнтів несиметрії струмів АД для усіх режимів роботи. Обмеження щодо застосування методу п. 4.2, накладаються, коли ЕП входить у нестійкий режим роботи, вони детально розглянуті у Розділі 3. За наявності коливань швидкості струми статора АД стають несиметричними відносно нуля, а в низці випадків і не періодичними. Внаслідок цього втрачає сенс гармонійний аналіз струмів, а значення коефіцієнтів несиметрії струмів АД на виході функціональної схеми рис. 4.1, стають некоректними [39]. Для уникнення цього в модель ТПН-АД з синхронізацією з напругою мережі обов'язково необхідно ввести блок перевірки на наявність автоколивань швидкості АД в усталених режимах роботи [27]. Для опису залежності коефіцієнтів несиметрії струмів від ковзання ротора АД використовується метод накладення симетричних складових прямої та зворотної послідовності напруг

$$K_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2 Z_{e1}}{U_1 Z_{e2}} = K_u \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}, \quad (4.24)$$

де Z_{e1} , Z_{e2} – еквівалентні опори АД струмам прямої та зворотної послідовності, Ом.

За припущення про лінійність параметрів АД еквівалентні опори визначаються за виразами

$$\left. \begin{aligned} Z_{e1} &= \sqrt{\left(c \cdot X_1 + c^2 \cdot X_2'\right)^2 + \left(c \cdot R_1 + \frac{c^2 \cdot R_2'}{s}\right)}, \\ Z_{e2} &= \sqrt{\left(c \cdot X_1 + c^2 \cdot X_2'\right)^2 + \left(c \cdot R_1 + \frac{c^2 \cdot R_2'}{2-s}\right)}, \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

$$\text{де } c = 1 + \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_\mu} = 1 + \frac{Z_1}{Z_\mu}.$$

На рис. 4.6 зображені залежності $K_i = f(s)$, розраховані за лінійним виразом (4.24) для деяких значень K_u у діапазоні робочих ковзань АД $0 \leq s \leq 1$. Очевидно, що коефіцієнти несиметрії напруги та струмів дорівнюють між собою лише за умови рівності ковзання одиниці (зокрема, у режимі короткого замикання) [40].

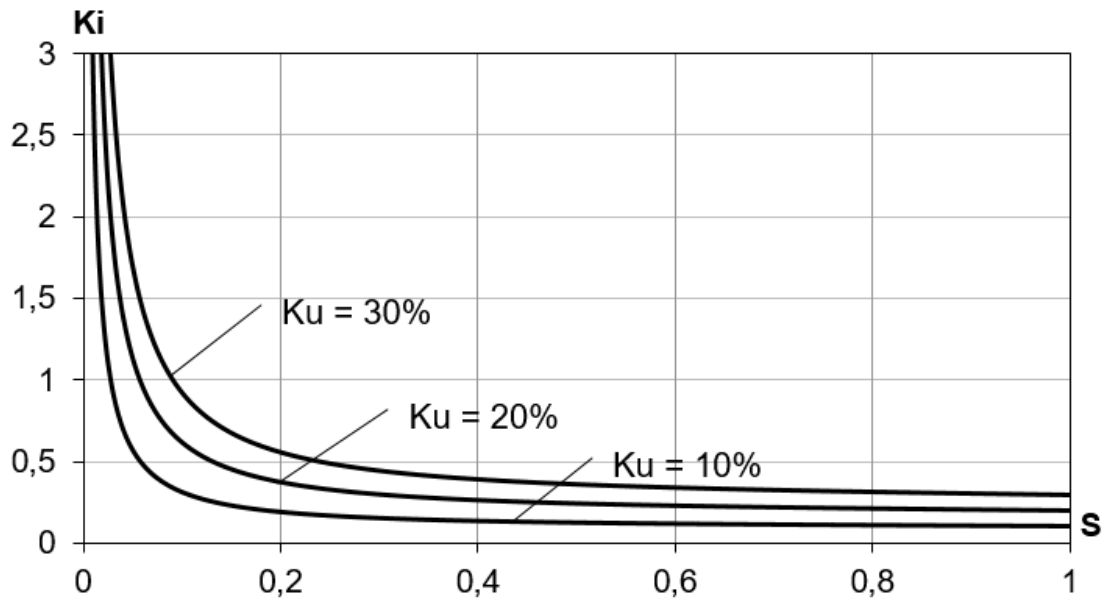


Рис. 4.6. Розрахункові залежності коефіцієнтів несиметрії струмів від ковзання АД при несиметричному живленні ТПН-АД

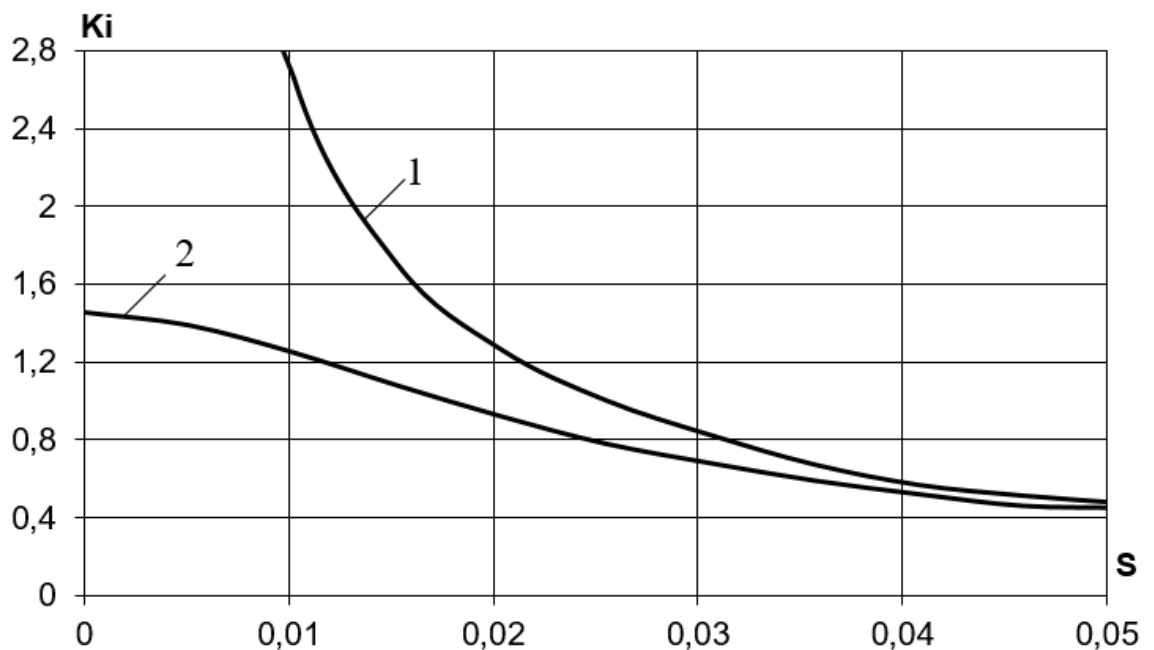


Рис. 4.7. Залежності коефіцієнтів несиметрії струмів від ковзання при несиметричному живленні ТПН-АД, отримані за допомогою:

1 – лінійної моделі АД ; 2 – нелінійної моделі АД.

Параметри: $K_u = 10\%$, $\alpha = \gamma = 0$ ел. град., $J_\Sigma = 2J_{дв}$

У разі зменшення ковзання результуючий опір Z_{e1} збільшується, тоді, як Z_{e2} практично не змінюється. Це призводить до збільшення коефіцієнта несиметрії струмів до значень $K_i > K_u$. З рис. 4.6 випливає, що на робочій ділянці механічної характеристики АД, у сталому режимі, повинно очікуватися значне збільшення коефіцієнта несиметрії струмів $K_i \gg 1$, а за умови ковзання, що дорівнює нулю, коефіцієнт K_i має наближатися до безкінечності. Моделювання ТПН-АД з урахуванням нелінійностей двигуна дає можливість оцінити реальний вплив робочого ковзання на величину коефіцієнта K_i в діапазоні ковзань $0 < s < s_n$. На рис. 4.7 приведені залежності, отримані за допомогою лінійної та нелінійної моделей АД. Їх знято за відсутності впливу тиристорного перетворювача ($a = g = 0$), при значеннях $K_u = 10\%$ і відсутності навантаження. Крива, отримана на нелінійній моделі, характеризується кінцевим максимальним значенням коефіцієнта несиметрії струмів. Це значення дорівнює $K_i = 1,43$. У точці $s = s_n$ залежність, розрахована на лінійній моделі, наближається до залежності, отриманої за умови врахування нелінійностей АД. Залежності коефіцієнтів несиметрії струмів від коефіцієнтів несиметрії напруги в розімкнутих системах ТПН-АД приведені на рис. 4.8,а і 4.8,б. Залежності показані для декількох кутів керування, за однакового навантаження, що визначається моментом $M_c = 0,7M_n$. Для забезпечення стійкої роботи ТПН-АД з СН сумарний момент інерції прийнято рівним $J_{\Sigma} = 2J_{дв}$. При коефіцієнті несиметрії напруги ДЖ, що дорівнює нулю (відповідає симетричній системі напруг) струми статора АД симетричні, а коефіцієнти несиметрії струму АД дорівнюють нулю. За однакових коефіцієнтів несиметрії напруги ДЖ максимальні значення K_i спостерігаються за відсутності впливу ТПН ($\alpha = \gamma = 0$). Своєю чергою, при живленні двигуна від ТПН і збільшенні кутів керування, значення K_i зменшуються. Це явище можна пояснити збільшенням ковзань АД і відзначити, як вплив, який чинить тиристорний перетворювач на несиметрію струмів АД. Збільшення коефіцієнтів несиметрії струмів пов'язане зі збільшенням K_u .

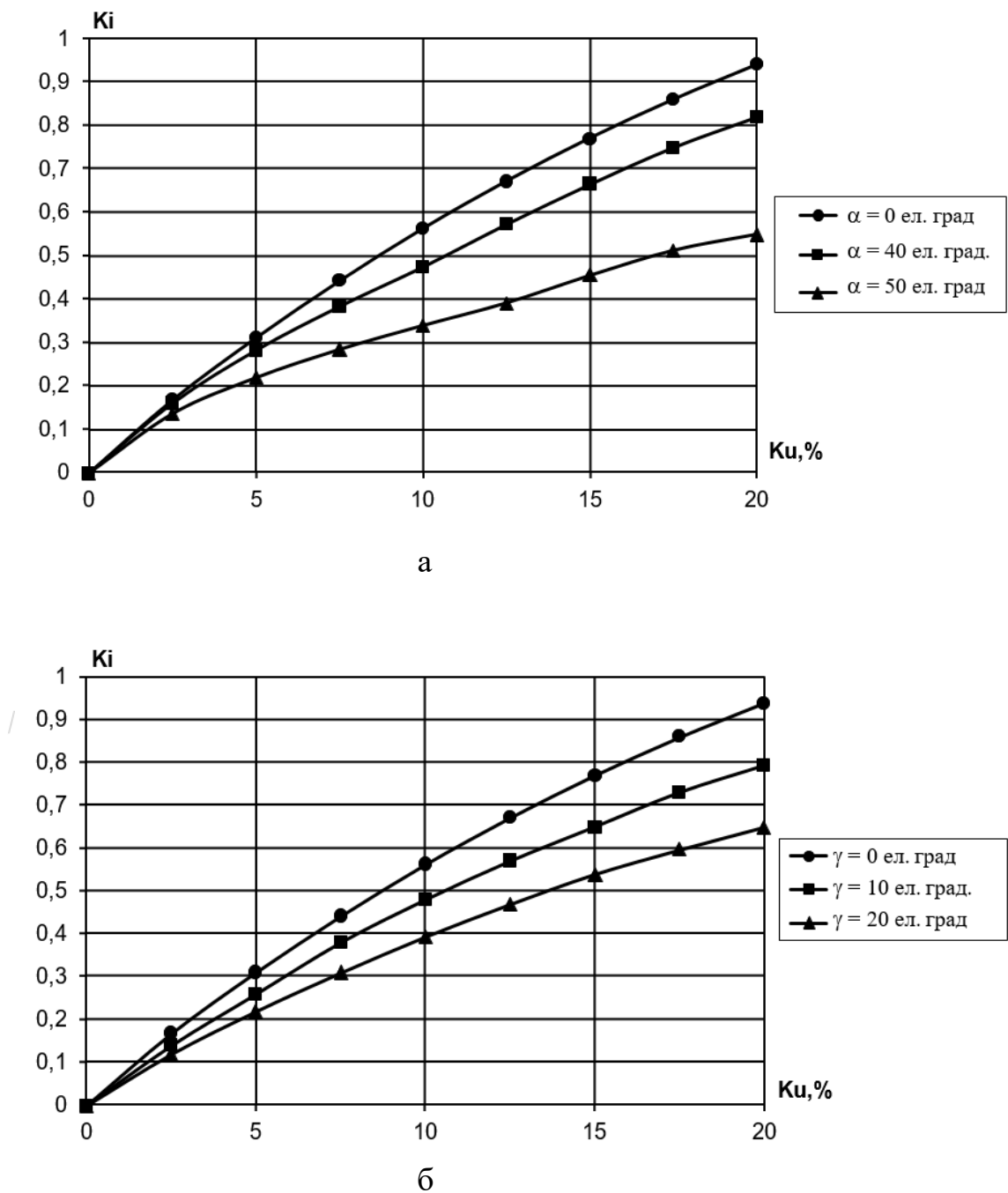


Рис 4.8. Залежності коефіцієнтів несиметрії струмів від коефіцієнтів несиметрії напруги у розімкнутій системі ТПН-АД, $M_c = 0,7M_H$, з синхронізацією: а – з напругою, при кутах керування $\alpha = 0$, $\alpha = 30$, $\alpha = 50$ ел. град.; б – зі струмом, при значеннях безструмових пауз: $\gamma = 0$, $\gamma = 10$, $\gamma = 20$ ел. град.

Причому максимального значення коефіцієнт несиметрії струмів набуває у разі максимального K_u , що дорівнює 20% для випадку $\alpha = \gamma = 0$. Це значення для досліджуваного АД не перевищує 0,943. Характерний вплив несиметрії на динаміку АД (рис. 4.5). Момент і швидкість АД мають коливальний характер. Коливання характеризуються частотою 100 Гц і розглядаються як шкідливе явище, що порушує нормальну роботу асинхронних двигунів [6]. Збільшення величини несиметрії напруги збільшує тривалість перехідних процесів АД. Для підтвердження цього в табл. 4.4 наведено залежність часу розгону асинхронного двигуна 4АМУ90L4 від величини коефіцієнта несиметрії напруги для умов: $M_c = 0,75M_n$, $\alpha = 0$ ел. град, $J_\Sigma = 2J_{дв}$.

Таблиця 4.4

Залежність часу розгону асинхронного двигуна 4АМУ90L4 від величини коефіцієнта несиметрії напруги

$K_u, \%$	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
t_p, c	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,2	0,22

При несиметрії напруги ДЖ значення діючих струмів статора в кожній з фаз АД різні. При номінальних моментах навантаження в одній фазі (двох фазах) АД значення діючих струмів перевищують номінальну величину, що характерно для двигунів усіх типорозмірів. Для АД 4А90L4 значення діючих струмів статора за умов номінального моменту $M_c = M_n$ і несиметрії напруги, яка визначається коефіцієнтами $K_u = 5\%, 10\%$ приведені в табл. 4.5. Очевидно, що це неприпустимо для експлуатації двигунів, насамперед за умовами нагрівання [6]. Ця обставина накладає обмеження на застосування АД при несиметричному живленні у широкому діапазоні навантажень. У табл. 4.6 для деяких коефіцієнтів несиметрії напруги джерела живлення показані значення допустимих моментів навантаження. За вказаними моментами можлива робота АД за умови, що жоден зі струмів статора АД не перевищує номінального значення.

Таблиця 4.5

Значення діючих струмів статора АД за умови живлення від джерела з несиметрією напруги

$K_u = 5\%$			$K_u = 10\%$		
I_a	I_b	I_c	I_a	I_b	I_c
$0,852 I_H$	$1,253 I_H$	$1,062 I_H$	$0,763 I_H$	$1,524 I_H$	$1,173 I_H$

Таблиця 4.6

Допустимий діапазон моментів навантаження АД за умовою тривалої безпечної роботи

K_u	M_c
2,5%	$0 \dots 0,88 M_H$
5%	$0 \dots 0,76 M_H$
10%	$0 \dots 0,53 M_H$
15%	$0 \dots 0,29 M_H$

Для двигунів одного виконання проблема несиметрії найактуальніша для потужніших АД, що зумовлено більшими значеннями коефіцієнтів несиметрії струмів [1]. Однак для двигунів різного виконання і типорозмірів це твердження не завжди вірне. Це пояснюється істотним впливом параметрів і робочих ковзань АД, що носить індивідуальний характер.

4.4. Симетрування струмів статора асинхронного двигуна

4.4.1. Схеми та математичний опис системи автоматичного симетрування. Система автоматичного симетрування (САС) призначена для зменшення несиметрії струмів АД, спричиненої несиметрією напруги ДЖ. Принцип симетрування полягає у створенні штучної несиметрії ТПН, що дає змогу компенсувати несиметрію ДЖ [37, 39]. Умовою створення САС є необхідність застосування декількох каналів керування і зворотних зв'язків за наявності одного задавального сигналу керування. Причому керувальний вплив не є

постійною величиною, а має залежати від навантаження на валу двигуна. Оскільки тиристор є дискретним пристроєм, миттєві значення струмів статора АД не інформативні й не можуть бути сигналами зворотного зв'язку (33). Сигналами 33 у цьому разі є значення діючих струмів статора АД, що вимірюються за половину періоду напруги ДЖ. Це зумовлює застосування в САС трьох каналів керування і зворотного зв'язку – по каналу в кожній із фаз двигуна. Принципово можливо реалізувати і застосовувати САС з тиристорними перетворювачами напруги, як із синхронізацією з напругою мережі, так і зі струмом навантаження [9]. У першому випадку управління ведеться щодо кутів увімкнення тиристорів - α , у другому – величин безструмових пауз - γ . Функціональна схема системи автоматичного симетрування струмів АД при керуванні ТПН з синхронізацією з напругою мережі приведено на рис. 4.9.

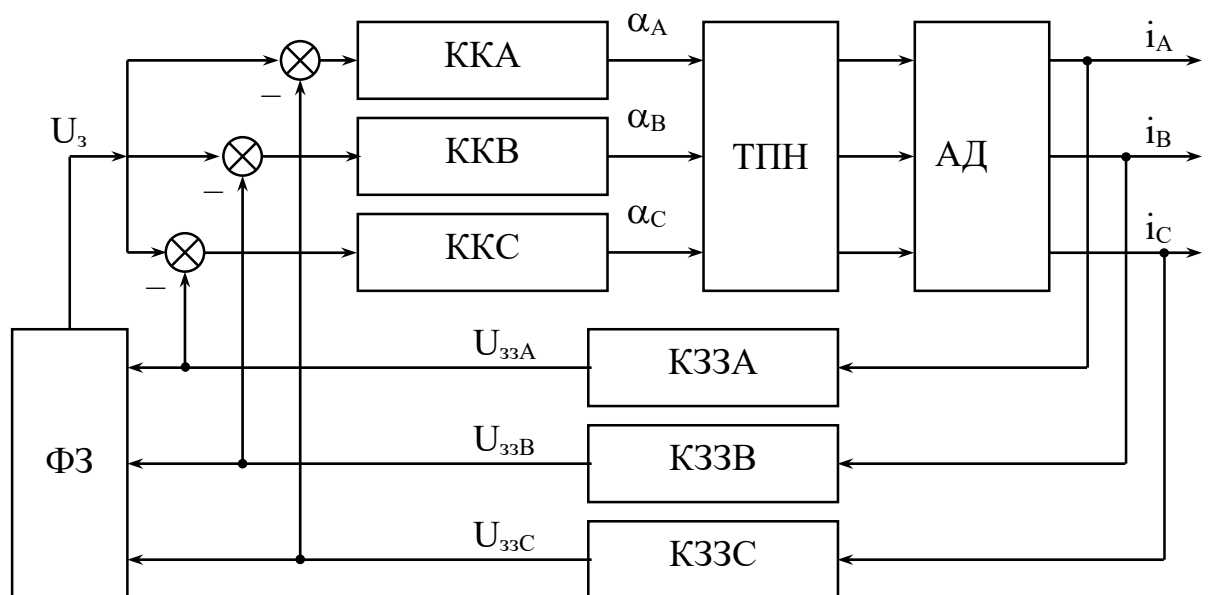


Рис. 4.9. Функціональна схема системи автоматичного симетрування струмів статора АД

До складу системи входять: ФЗ – формувач задавання; ККА (ККВ, ККС) – канали управління фазою А, В і С, відповідно; ТПН – тиристорний перетворювач напруги; АД – асинхронний двигун; К33А (К33В, К33С) – канали зворотного зв'язку фаз А, В і С, відповідно.

Формувач задавання формує сигнал керування у функції сигналів ЗЗ, який змінюється один раз упродовж напівперіоду напруги ДЖ, і дорівнює одній третині суми напруг зворотного зв'язку каналів фаз А, В і С. Канал зворотного зв'язку кожної з фаз (КЗЗА, КЗЗВ, КЗЗС) складається з (рис. 4.10):

ДС – датчик струму, що перетворює миттєві значення струму статора АД на миттєві значення напруги, які надходять на ЕОДС; ЕОДС – елемент обчислення значення діючого струму статора АД за половину періоду напруги джерела живлення; ЕЛП – елемент пам'яті, що зберігає значення напруги зворотного зв'язку. Значення напруги зворотного зв'язку оновлюється через кожен інтервал часу, що дорівнює половині періоду напруги ДЖ.

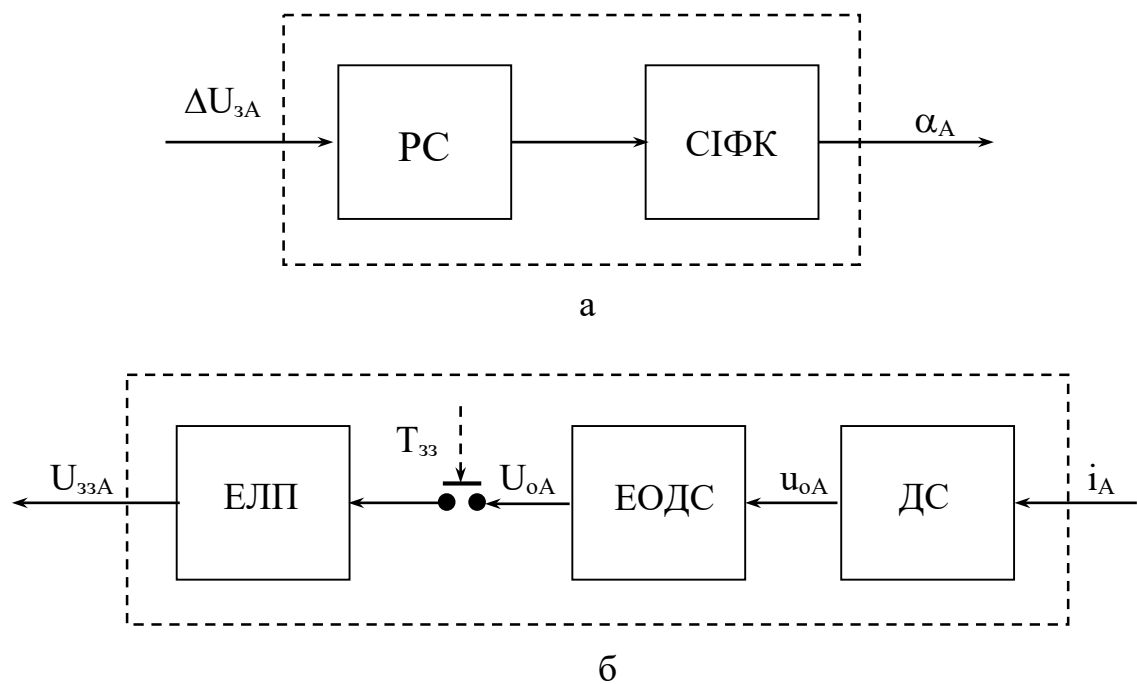


Рис. 4.10. Функціональні схеми: а – каналу керування і б – каналу зворотного зв'язку фази А системи автоматичного симетрування струмів АД

Напруга завдання і напруги зворотного зв'язку кожної з фаз надходять на суматор і визначають різниці сигналів $\Delta U_{3i} = U_{3i} - U_{33i}$, які надходять на входи каналів керування фаз. Канали керування фаз (ККА, ККВ, ККС) складаються з регуляторів струму (РС) і систем імпульсно-фазового керування (СІФК).

У пропорційно-інтегральному (ПІ) регуляторі сигнал на виході пропорційний вхідному сигналу та інтегралу від вхідного сигналу у часі [41]. Пропорційна (П) складова стабілізує роботу САС під час перехідних процесів, тоді як інтегральна забезпечує астатизм у сталому режимі роботи. У цьому разі під час пуску ЕП немає потреби в П-складовій регулятора. Робота САС під час перехідного процесу обмежується природним чином. За рахунок великих значень струмів АД сигнали U_3 і U_{33} обмежені насиченням пристроїв САУ і дорівнюють максимальному значенню 10В, внаслідок чого сигнал ΔU_{3A} , що надходить на вхід регулятора, дорівнює нулю. Робота САС починається після закінчення перехідного процесу, пов'язаного зі зміною швидкості АД, тоді коли струми значно зменшуються, а елементи САУ виходять з насичення. З моменту початку роботи САС необхідно забезпечити плавне зростання сигналу на виході регулятора з $U_p = 0$ до $U_p = U_{p \text{ макс}}$, що забезпечується інтегральною складовою РС. Для низки умов, пропорційна складова призводить до надмірно швидкого зростання вихідної величини регулятора і кута α (γ) одного каналу або декількох каналів, що визначає нестійку роботу всієї САС.

Регулятори струму описуються передавальною функцією

$$H_{pc}(p) = \frac{R_e}{2 \cdot T_{ск} \cdot K_{п} \cdot K_{33} p}, \quad (4.26)$$

де $T_{ск}$ – сумарна постійна часу системи керування, с;

R_e – еквівалентний активний опір об'єкта регулювання (АД), що визначається за схемою заміщення, Ом;

K_{33} – коефіцієнт передачі каналу зворотного зв'язку, В/с;

$K_{п}$ – коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача, що розраховується як відношення першої гармоніки вихідної напруги до кута відмикання тиристорів U_1/α для системи з СН і U_1/γ для системи з СС.

$$T_{ск} = T_{сіфк} + T_{тпн} + T_{33} = \frac{1}{2} \frac{T_c}{6} + \frac{1}{2} \frac{T_c}{6} + \frac{T_c}{2} = 0,0133 \text{ с.}, \quad (4.27)$$

де $T_c = 0,02$ – період напруги джерела живлення, с.

Проблема коректного визначення коефіцієнта передачі ТПН полягає в тому, що U_1 змінюється в широких межах залежно від значень кута відмикання α (безструмової паузи γ) і поточних величин кута навантаження φ . Для однозначності визначення приймемо припущення, що перетворювач працює у верхній межі домежового режиму $\alpha = 90$ ел. град. = 1,57 рад. ($\gamma = 30$ ел. град. = 0,52 рад.) з номінальним моментом навантаження. Тоді для ТПН з СН для цих умов коефіцієнт передачі ТПН: $K_{\pi} = 65,2$ В/рад, для ТПН з СТ: $K_{\pi} = 121,3$ В/рад.

Залежність кута керування від керуючої напруги виражається на підставі виразу [42]

$$\alpha = 0 - K_{\text{сіфк } \alpha} U_{\text{вих рс}}, \quad (4.28)$$

де $K_{\text{сіфк } \alpha}$ – коефіцієнт передачі СІФК в ТПН з СН.

$$K_{\text{сіфк } \alpha} = \frac{\alpha_{\text{макс}}}{U_{\text{вих рс макс}}} = \frac{120}{10} = 12 \frac{\text{рад}}{\text{В}}. \quad (4.29)$$

Аналогічна залежність характерна ТПН з синхронізацією зі струмом навантаження

$$\gamma = 0 - K_{\text{сіфк } \gamma} U_{\text{вих рс}}, \quad (4.30)$$

$$K_{\text{сіфк } \gamma} = \frac{\gamma_{\text{макс}}}{U_{\text{вих рс макс}}} = \frac{60}{10} = 6 \frac{\text{рад}}{\text{В}}. \quad (4.31)$$

Значення коефіцієнта передачі каналу зворотного зв'язку

$$K_{\text{зз}} = \frac{U_{\text{зз макс}}}{I_{\text{макс}}} = \frac{U_{\text{зз макс}}}{2 \cdot I_{\text{н}}} = \frac{10}{2 \cdot 5,02} = 0,996 \frac{\text{В}}{\text{А}}. \quad (4.32)$$

Для забезпечення підвищеної швидкодії САС необхідно застосовувати адаптивні регулятори струму, параметри яких змінюються в кожен момент часу в залежності від поточного значення еквівалентного активного опору двигуна R_e . Застосування регуляторів з фіксованими параметрами дещо зменшує швидкодію САС, але значно спрощує систему керування. У цьому разі регулятори необхідно налаштовувати виходячи з параметрів АД за номінального моменту навантаження. Для двигуна 4АМУ90L4 еквівалентний активний опір за умовами номінального моменту становить $R_e = R_{\text{сн}} = 36,4$ Ом.

Передавальна функція регулятора струму для досліджуваного АД та ТПН з синхронізацією з напругою мережі має вигляд

$$H_{pc\ cн}(p) = \frac{21,1}{p}. \quad (4.33)$$

При застосуванні ТПН з синхронізацією зі струмом навантаження

$$H_{pc\ cc}(p) = \frac{11,3}{p}. \quad (4.34)$$

Особливістю САУ є безперервна робота каналів керування за тієї умови, що інформація про помилки неузгодженості напруги завдання і напруг зворотного зв'язку оновлюється один раз за півперіоду напруги ДЖ [38]. Можлива інша реалізація, яку можна охарактеризувати як систему дискретної дії каналів керування (рис. 4.11).

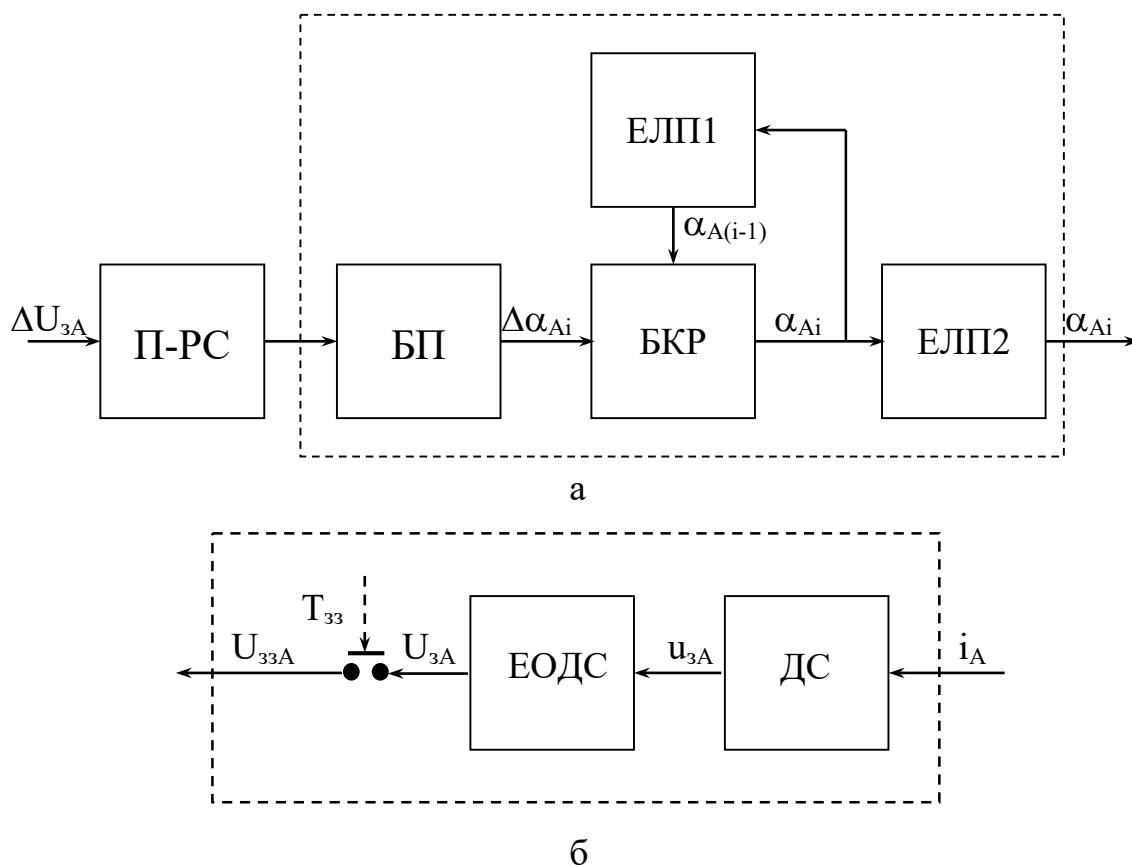


Рис. 4.11. Функціональні схеми: а – каналу керування і б – каналу зворотного зв'язку однієї з фаз САС дискретної дії

У цьому випадку і канали ЗЗ, і канали керування формують значення величин один раз за половину періоду напруги ДЖ. З виходу регулятора струму на вхід СІФК надходить сигнал, пропорційний приросту $\Delta\alpha$ ($\Delta\gamma$). Він коригує значення кута відмикання (безструмової паузи), яке визначало роботу тиристорів у попередній напівперіод напруги ДЖ. Передбачається застосування цифрових П – регуляторів струму та СІФК, до складу кожної з яких входять:

БП – блок перетворення, який описується залежністю

$$\Delta\alpha = K_{\text{сіфк } \alpha} \Delta U_{\text{вих рс}}, \quad (4.35)$$

для ТПН-АД з синхронізацією зі струмом навантаження

$$\Delta\gamma = K_{\text{сіфк } \gamma} \Delta U_{\text{вих рс}}. \quad (4.36)$$

БКР – блок корекції, де реалізується формування кута α , який визначатиме роботу тиристора в даній фазі в поточний напівперіод напруги ДЖ.

Блок корекції описується виразом

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} - \Delta\alpha_i. \quad (4.37)$$

В ТПН-АД з синхронізацією вентилів зі струмом навантаження поточна величина безструмової паузи визначається

$$\gamma_i = \gamma_{i-1} - \Delta\gamma_i \quad (4.38)$$

Так само, в кожному з СІФК входять два елементи пам'яті – ЕЛП1 і ЕЛП2, призначені для зберігання значень напруг керування, пропорційних попередньому і поточному значенню α (або γ). За такої реалізації САС відсутня необхідність у застосуванні елементів пам'яті у каналах ЗЗ. До недоліку можна віднести наявність статичної помилки і принципову неможливість зменшення значень коефіцієнтів несиметрії струмів АД до нульових значень.

4.4.2. Результати симетрування та їх аналіз. При дослідженні виконувався пуск АД з визначеними показниками несиметрії напруги ДЖ. Визначалися усі необхідні характеризуючі параметри та показники. Потім задіялася система автоматичного симетрування, а через інтервал часу визначали результати симетрування струмів АД. На рис. 4.12 приведені осцилограми швидкості та струмів, що ілюструють процес симетрування.

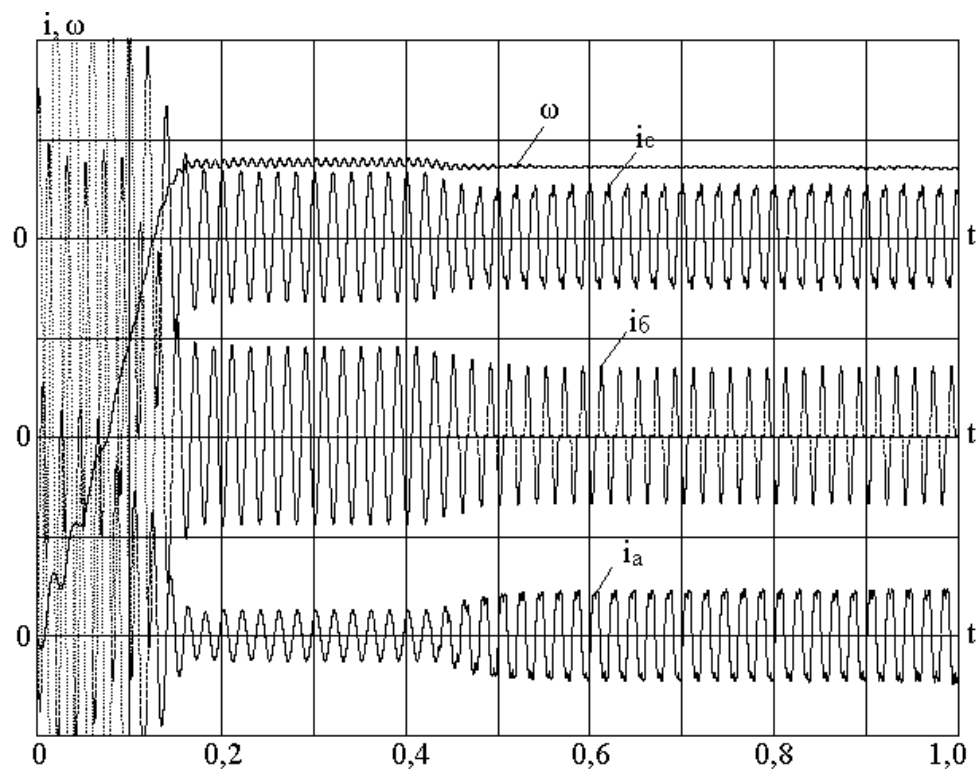


Рис. 4.12. Осцилограми швидкості та струмів АД 4АМУ90L4

Здійснюється прямий пуск двигуна 4АМУ90L4 з сумарним моментом інерції $J_{\Sigma} = 2J_{\text{дв}}$ і моментом навантаження $M_c = 0,6M_n$ за умовами несиметрії ДЖ, що характеризується коефіцієнтом несиметрії напруги $K_u = 12,5\%$. До початку режиму симетрування спостерігаються значні відмінності струмів АД і коливання швидкості, характерні для несиметричного режиму роботи електродвигуна. Після розгону АД в момент часу $t = 0,4$ с. починає діяти зворотній зв'язок, що призводить до істотного зменшення впливу несиметрії ДЖ. При цьому коливання швидкості з частотою 100 герц при навантаженні на валу АД, яке визначається моментами $0 \leq M \leq 0,3M_n$ істотно зменшуються, а при навантаженнях $0,3M_n \leq M \leq 0,9M_n$ повністю усуваються.

На відносні показники симетрування не впливає те, з яким кутом відкриття тиристорів (величиною безструмової паузи) працював електропривод до замикання зворотним зв'язком – тобто до початку процесу симетрування. Набагато значнішим є вплив, який чинить величина навантаження на валу двигуна [39].

Симетрування за допомогою САС призводить не тільки до певної рівності діючих струмів статора у фазах АД, а й дає змогу істотно зменшити ці значення відносно максимального струму, що фіксувався до початку дії зворотного зв'язку.

Це дає змогу істотно розширити допустимий за умовою нагріву АД діапазон можливих робочих моментів при несиметрії напруги джерела живлення (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Допустимі за нагріванням навантаження АД 4АМУ90L4
при живленні від джерела з несиметричною напругою

K_u	M_c до симетрування	M_c після симетрування
2,5%	$0 \dots 0,88M_H$	$0 \dots 0,97M_H$
5%	$0 \dots 0,76M_H$	$0 \dots 0,93M_H$
10%	$0 \dots 0,53M_H$	$0 \dots 0,85M_H$
15%	$0 \dots 0,29M_H$	$0 \dots 0,74M_H$

Ступінь наближення магнітного поля АД до кругового в процесі симетрування можливо проілюструвати на прикладі годографів струмів статора АД, побудованих в осях a, b . Вирази для переходу з трифазної системи координат у двофазну мають вигляд [31]

$$\left. \begin{aligned} I_\alpha &= \frac{2}{3}I_a - \frac{1}{3}(I_b + I_c), \\ I_\beta &= j\frac{1}{\sqrt{3}}(I_b - I_c), \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

де I_a, I_b, I_c – струми статора АД в осях А,В,С, А.

На рис. 4.13,а зображено годограф струмів ТПН-АД з СС, в осях a, b , при живленні симетричною напругою. У цьому випадку величина безструмової паузи дорівнює нулю, момент навантаження $M_c = 0,5M_H$. На рис. 4.13,б умови роботи ті ж самі, але величина безструмової паузи відповідає $\gamma = 20$ ел. град.

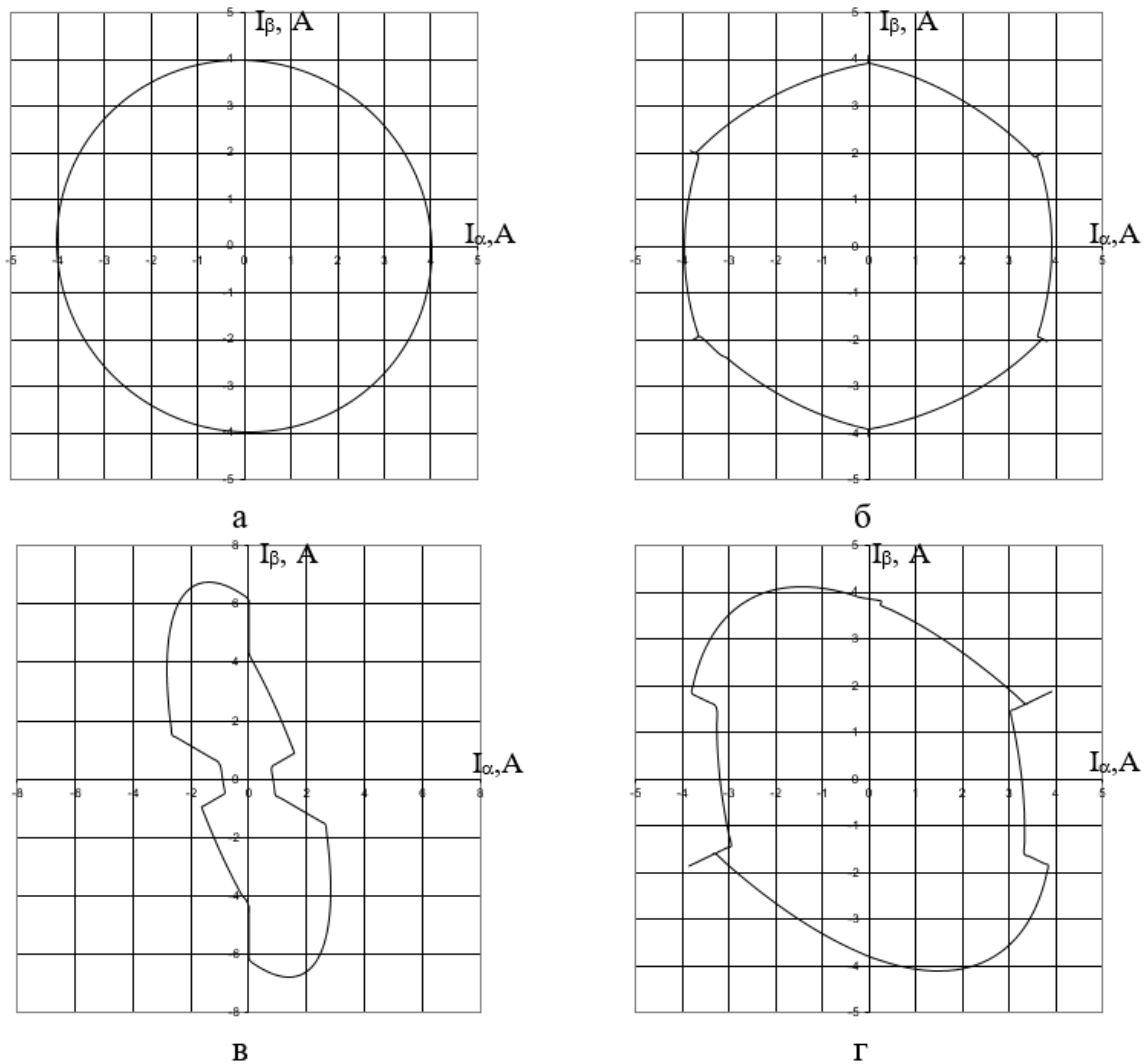


Рис. 4.13. Годографи струмів статора АД

Рис. 4.13,в і рис. 4.13,г ілюструють годографи струмів ТПН-АД за умови живлення несиметричною напругою ДЖ ($K_u = 10\%$, $\gamma_{нач} = 0$) і в замкнутій САС після симетрування за час $t = 0,8$ с, відповідно. Наочно виражені тенденції "вирівнювання" годографа і прояв роботи ТПН. При несиметрії напруги ДЖ, яка визначається коефіцієнтами $K_u \leq 15\%$, САС забезпечує зниження значень коефіцієнтів несиметрії струмів АД більш ніж на порядок [38]. У табл. 4.8 приведені показники симетрування струмів АД 4АМУ90L4 при різних моментах навантаження, умови, $\alpha_{поч} = 0$ ($\gamma_{поч} = 0$) і часі роботи системи автоматичного симетрування: $T_{сим} = 0,8$ с.

Таблиця 4.8

Показники симетрування струмів АД

$M_c/$ M_H	$K_u = 2,5\%$		$K_u = 5\%$		$K_u = 10\%$		$K_u = 15\%$	
	K_{io}^*	$K_{i\text{CAC}}^{**}$	K_{io}	$K_{i\text{CAC}}$	K_{io}	$K_{i\text{CAC}}$	K_{io}	$K_{i\text{CAC}}$
0,9	0,131	0,0062/ 0,0065	0,249	0,0076/ 0,0121	×	×	×	×
0,8	0,147	0,0042/ 0,0043	0,277	0,0039/ 0,0067	0,521	0,0165/ 0,0169	×	×
0,7	0,165	0,0033/ 0,0035	0,314	0,0097/ 0,0081	0,591	0,0230/ 0,0192	0,831	0,0247/ 0,0199
0,6	0,188	0,0131/ 0,0042	0,358	0,0237/ 0,0112	0,678	0,0181/ 0,0199	0,962	0,0206/ 0,0267
0,5	0,214	0,0303/ 0,0011	0,411	0,0098/ 0,0085	0,767	0,0286/ 0,0248	1,127	0,0265/ 0,0239
0,4	0,243	0,0436/ 0,0052	0,472	0,0156/ 0,0153	0,922	0,0398/ 0,0235	1,134	0,0471/ 0,0262
0,3	0,275	0,0271/ 0,0096	0,539	0,0459/ 0,0172	1,083	0,0466/ 0,0251	1,600	0,0604/ 0,0331
0,2	0,303	0,0342/ 0,0105	0,604	0,0689/ 0,0159	1,257	0,433/ 0,0151	1,919	0,571/ 0,323
0,1	0,320	0,0275/ 0,0158	0,649	0,0397/ 0,0265	1,398	0,651/ 0,459	2,216	0,962/ 0,609
0	0,322	0,0657/ 0,0285	0,658	0,0957/ 0,0370	1,456	0,994/ 0,967	2,339	1,291/ 1,204

* K_{io} – коефіцієнт несиметрії струмів асинхронного двигуна в розімкнутій системі ТПН-АД;

** $K_{i\text{CAC}}$ – коефіцієнт несиметрії струмів у системі автоматичного симетрування (у чисельнику для СН, у знаменнику – СС);

х – тривала робота АД за умовою нагріву неможлива.

При несиметрії напруг ДЖ, яка визначається коефіцієнтами $K_u < 6 - 7\%$, проявляється хороший ефект симетрування за будь-яких моментів навантаження. У разі навантаження $M_c / M_n = 0 - 0,2$ і несиметрії з $K_u > 7\%$ ефект знижується. Це особливо проявляється у випадках малих навантажень АД і на холостому ходу. Робота і принципи управління САС за відсутності навантаження і в області малих моментів навантажень мають деякі особливості:

- накладаються природні обмеження ТПН, за якими напруга на виході перетворювача принципово не може перевищувати напругу на вході. За наявності значної несиметрії ДЖ це знижує показники симетрування;

- для деяких типів АД, переважно малої потужності, за несиметрії джерела живлення з $K_u > 9 - 11\%$ система проявляє ознаки нестійкості, що тягне за собою порушення нормальної роботи. Одним із способів розв'язання цієї проблеми є, для цього режиму роботи, керування тільки за одним каналом – каналом з максимальним діючим струмом статора АД. Наприклад, каналом В. Кут керування СІФК (α, γ) другого каналу фіксується рівним куту третього каналу $\alpha_c = \alpha_A$ ($\gamma_c = \gamma_A$). У цьому разі зменшується швидкодія САС і показники симетрування, однак, потенційно зберігається можливість здійснення режиму симетрування;

- характерне переважання режимів двофазної провідності, що також ускладнює процес симетрування;

- за істотної несиметрії ДЖ і моментів навантаження $M_c / M_n = 0,05 - 0,2$ ТПН-АД з синхронізацією зі струмом забезпечує кращі показники симетрування.

Зі збільшенням навантаження час симетрування зменшується [15]. Швидкодію САС при несиметрії, що визначається коефіцієнтом $K_u = 15\%$, і різних навантажень АД 4АМУ90L4, ілюструють залежності, приведені на рис. 4.14. Початкові α і γ дорівнюють нулю, що відповідає одній із граничних умов забезпечення швидкодії.

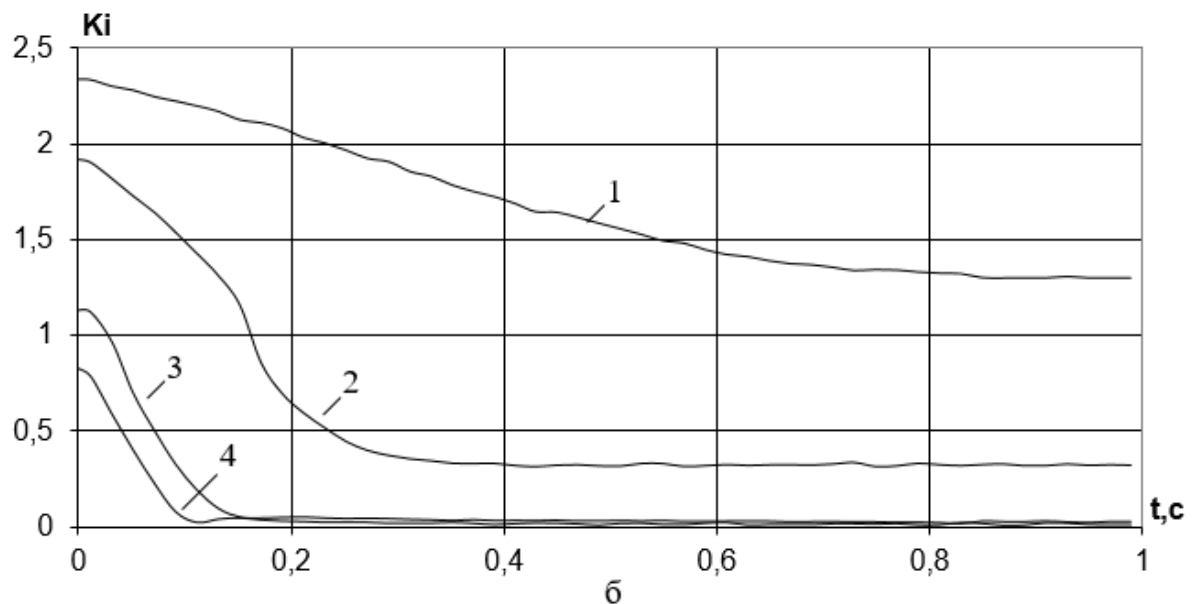
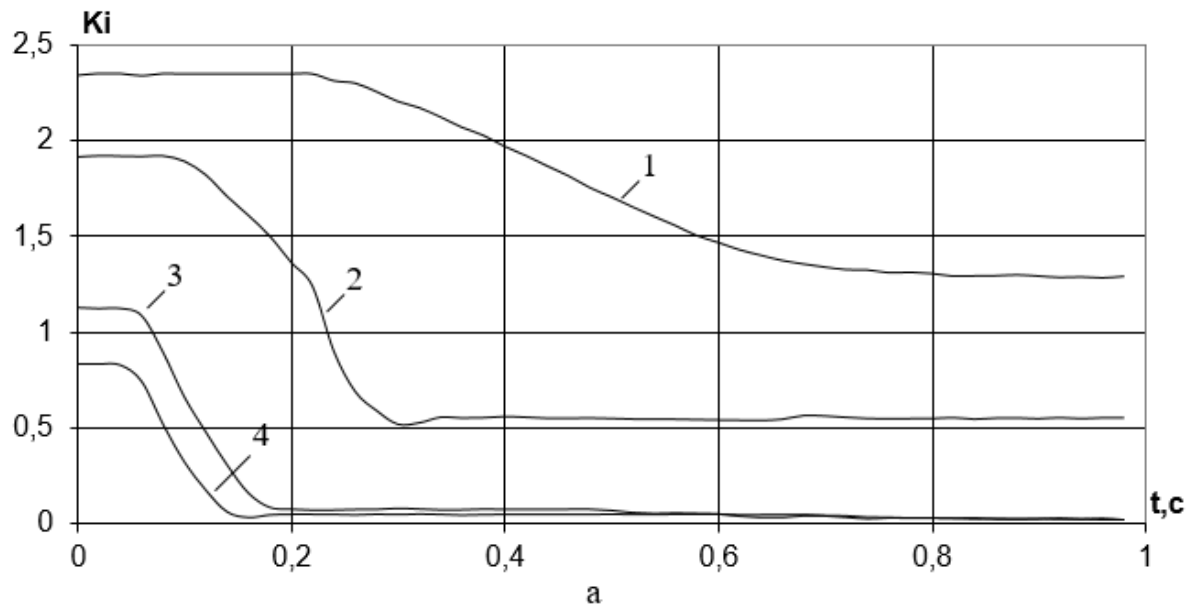


Рис. 4.14. Залежності коефіцієнтів несиметрії струмів АД у часі від початку процесу симетрування для ТПН-АД з: а – СН, б – СТ.

1 - $M_c = 0$; 2 - $M_c = 0,2M_H$; 3 - $M_c = 0,5M_H$; 4 - $M_c = 0,7M_H$

Час симетрування істотно залежить від початкових кутів увімкнення ТПН, величини навантаження АД і величини несиметрії напруги ДЖ. За межових умов і фіксованих параметрів регуляторів струму швидкодія САС не перевищує 0,8 - 1,2 секунд для АД середньої потужності. У разі застосування адаптивних регуляторів загальна швидкодія може бути збільшена. Для ТПН-АД з СН існує

інтервал часу, який характеризується відсутністю режиму симетрування. Це може бути пояснено наявністю зони нечутливості та відсутністю симетрування за кутів керування α менших від кута навантаження $\varphi_{дв}$. Очевидно, що ця зона буде максимальною в режимі ХХ, коли $\varphi_{дв} \approx 90$ ел. град. Швидкодію ТПН-АД з СС можна визнати кращою, зважаючи на природню відсутність зони нечутливості.

Запропонована система симетрування струмів дає змогу істотно зменшити втрати потужності в АД, які зростають під час роботи ЕП від джерела з несиметричною напругою. Більш докладне дослідження за цим показником приведено в наступному розділі роботи. Відзначаючи інші переваги САС, слід зазначити, що система не тільки виконує симетрування струмів АД, а й у разі замикання зворотним зв'язком призводить до стійкості ТПН-АД. У процесі дослідження ТПН-АД з синхронізацією з напругою мережі після її замкнення не зафіксовано жодної робочої точки, в якій би спостерігалися типові коливальні явища [38, 39].

ГЛАВА 5

МІНІМІЗАЦІЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В АД

5.1. Обґрунтування можливості та умов зменшення втрат потужності в АД

Електропривод з тиристорним перетворювачем напруги дає можливість зменшення втрат в асинхронному двигуні. Йдеться про тривалу роботу АД на штучних характеристиках в області номінального ковзання з втратами меншими, ніж на робочій ділянці природної характеристики [12]. Керуючою дією є вихідна напруга перетворювача, а робота асинхронного двигуна відбувається на оптимальній регульовальній механічній характеристиці. Керування напругою здійснюється вниз від номінальної. Оптимальна характеристика розраховується заздалегідь, виходячи з розв'язання задачі екстремального керування згідно з критерієм мінімуму втрат потужності [13].

Під час аналітичного опису процесів перетворення енергії враховується низка припущень:

- лінійність магнітного кола АД;
- лінійність робочої ділянки штучної механічної характеристики АД;
- врахування перших гармонійних складових струмів і напруг статора АД.

Це дає змогу вивести аналітичну залежність закону керування, що відповідає оптимальній механічній характеристиці для будь-якого з відомих типів асинхронних двигунів. Враховуються чотири основні складові втрат АД. Для подальшого аналізу їх зручно розділити на дві групи – втрати від навантаження і втрати від намагнічування. Відомо, що втрати від навантаження, які існують в АД за номінальних умов роботи, описуються двома складовими [4]

$$\Delta P_{\text{нг н}} = \Delta P_{1\text{мн}} + \Delta P_{2\text{мн}}, \quad (5.1)$$

де $\Delta P_{1\text{мн}}$ – втрати в міді статора від струму навантаження при номінальному моменті навантаження, Вт;

$\Delta P_{2\text{мн}}$ – втрати в міді ротора від струму навантаження при

номінальному моменті навантаження, Вт.

Сумарні втрати в АД на намагнічування при номінальному режимі роботи визначаються

$$\Delta P_{0H} = \Delta P_{1M0H} + \Delta P_{сн}, \quad (5.2)$$

де ΔP_{1M0H} – втрати в міді статора від струму намагнічування, Вт;

$\Delta P_{сн}$ – втрати в сталі, Вт.

При регулюванні координат АД зміною напруги перетворювача, втрати від навантаження і на намагнічування визначаються [5]

$$\begin{aligned} \Delta P_{нг} &= \frac{M_c}{M_H} \cdot \frac{s}{s_H} \cdot \Delta P_{нг}, \\ \Delta P_0 &= \frac{M_c}{M_e} \cdot \Delta P_{0H}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

де M_c – момент на природній характеристиці при ковзанні, що дорівнює ковзанню на штучній характеристиці при зниженій напрузі $U_1 < U_{1H}$.

При врахуванні прийнятих припущень справедливе співвідношення $\frac{M_e}{s} = \frac{M_H}{s_H}$, яке дає можливість виразити значення моменту M_c через значення ковзання. Тоді втрати визначаються за виразом

$$\Delta P = \Delta P_{нг} + \Delta P_0 = \frac{\Delta P_{нгH}}{M_H \cdot s_H} \cdot M_c \cdot s + \frac{\Delta P_{0H} \cdot s_H}{M_H} \cdot M_c \cdot \frac{1}{s}. \quad (5.4)$$

Очевидно, що існує деяке ковзання $s_{опт}$, за якого сумарні втрати в двигуні будуть мінімальними. Розв'язання задачі зі знаходження цього оптимального ковзання можна виконати шляхом дослідження на екстремум функції (5.4) і визначення значення s , за якого величина ΔP набуває свого екстремального (мінімального) значення. Для аналітичного розв'язання необхідно часткову похідну по ковзанню виразу ΔP прирівняти до нуля. Коріння цього рівняння і характеризують екстремуми досліджуваної функції.

Згідно з умовою мінімуму втрат потужності необхідно, щоб АД у першому (третьому) квадранті працював на штучній регульовальній характеристиці з оптимальним ковзанням

$$s_{\text{опт}} = s_{\text{н}} \sqrt{\frac{\Delta P_{0\text{н}}}{\Delta P_{\text{нг н}}}}, \quad (5.5)$$

Умова мінімуму втрат потужності буде виконуватися під час роботи в області робочих моментів від нуля до деякого граничного моменту $M_{\text{гр}}$.

$$M_{\text{гр}} = M_{\text{н}} \sqrt{\frac{\Delta P_{0\text{н}}}{\Delta P_{\text{нг н}}}}, \quad (5.6)$$

Значення граничного моменту відповідає перетину регулювальної механічної характеристики з природною і не залежить від поточних моментів навантаження і швидкості АД [13]. Уявлення про механічні характеристики, на яких працює двигун 4АМУ100L4, дає рис. 5.1

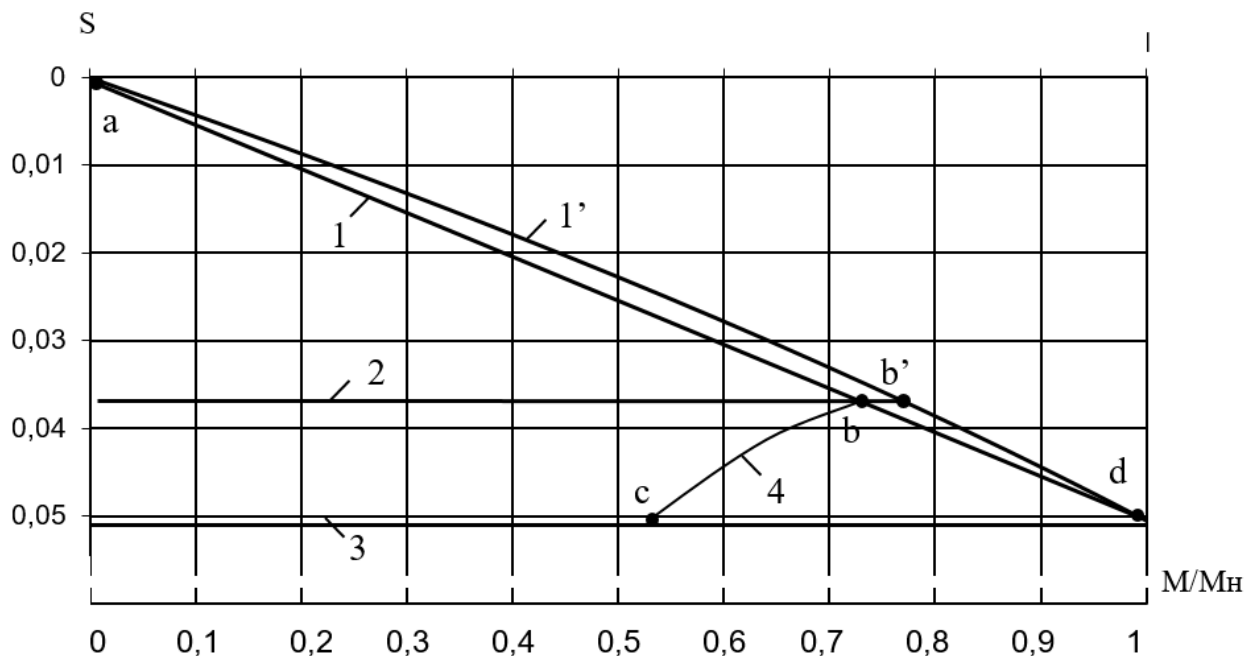


Рис 5.1. Механічні характеристики двигуна 4АМУ100L4

Крива 1 – це лінеаризована ділянка природної механічної характеристики. Тут же для порівняння приведена ділянка реальної природної механічної характеристики двигуна 4АМУ100L4 (характеристика 1'), що дає змогу оцінити вплив лінеаризації. Прямая 2 – регулювальна характеристика, що відповідає оптимальному за критерієм мінімуму втрат закону керування. Характеристика 3 відповідає регулюванню АД з номінальним ковзанням. Усі робочі точки, що

лежать на характеристиці 2, відповідають оптимальному режиму. Зі збільшенням моменту ця характеристика перетинається з природною в точці b (b'), яка відповідає граничному моменту $M_{гр}$. При подальшому збільшенні навантаження режим перестає бути оптимальним. Положення цієї точки і ширина робочої ділянки оптимальної регулювальної характеристики залежать від співвідношення між втратами на намагнічування і від навантаження в номінальному режимі. Як випливає з (5.6), граничний момент для кожного з АД визначається тільки їх власними параметрами.

В обох випадках при збільшенні або зменшенні ковзання, відносно характеристики 2, втрати в двигуні збільшуються. При зменшенні ковзання, збільшення втрат обмежується природною характеристикою. У нижній частині, у разі збільшення ковзання, можна провести умовну межу, де втрати дорівнюватимуть втратам на природній характеристиці. Ця межа відповідає лінії 4 і названа "лінією рівних втрат". Область, обмежена ділянкою $a-b$ природної характеристики, віссю ковзань і лінією рівних втрат 4, є областю, в якій можливе формування режимів з втратами в АД меншими, ніж на природній характеристиці. Ця область і використовується при управлінні оптимальному за критерієм мінімуму втрат [40]. Інші характеристики охоплюють меншу ширину цієї області, а характеристика 3, крім того, має ділянку $c-d$, що знаходиться поза зазначеною областю. На цій ділянці двигун працює не тільки не в оптимальному режимі, а з втратами, що перевищують втрати на природній характеристиці.

Рис. 5.2 ілюструє графіки втрат потужності в АД на природній і регулювальній характеристиках двигуна 4АМУ100L4. Цифрові та літерні позначення кривих еквівалентні позначенням на рис. 5.1. Крива 1 відображає сумарні втрати в АД під час роботи на природній характеристиці. Ідеальні графіки втрат на будь-якій регулювальній характеристиці являють собою прямі, що проходять через початок координат. Пряма 2 відповідає втратам на оптимальній регулювальній характеристиці. Сумарні втрати при підтримці ковзання номінальним у всьому діапазоні робочих моментів відображає пряма 3. Лінія рівних втрат зливається з частиною $a-b$ параболи втрат.

Область, обмежена кривою а - b, віссю ΔP і лінією втрат 2 є областю економії потужності втрат [40]. Будь-яка робоча точка на природній характеристиці, крім точок, що лежать далі за точку b, буде характеризуватися гіршою енергетикою, ніж у режимі мінімізації. На ділянці c - d характеристики 3 втрати виявляються більшими, ніж на природній характеристиці.

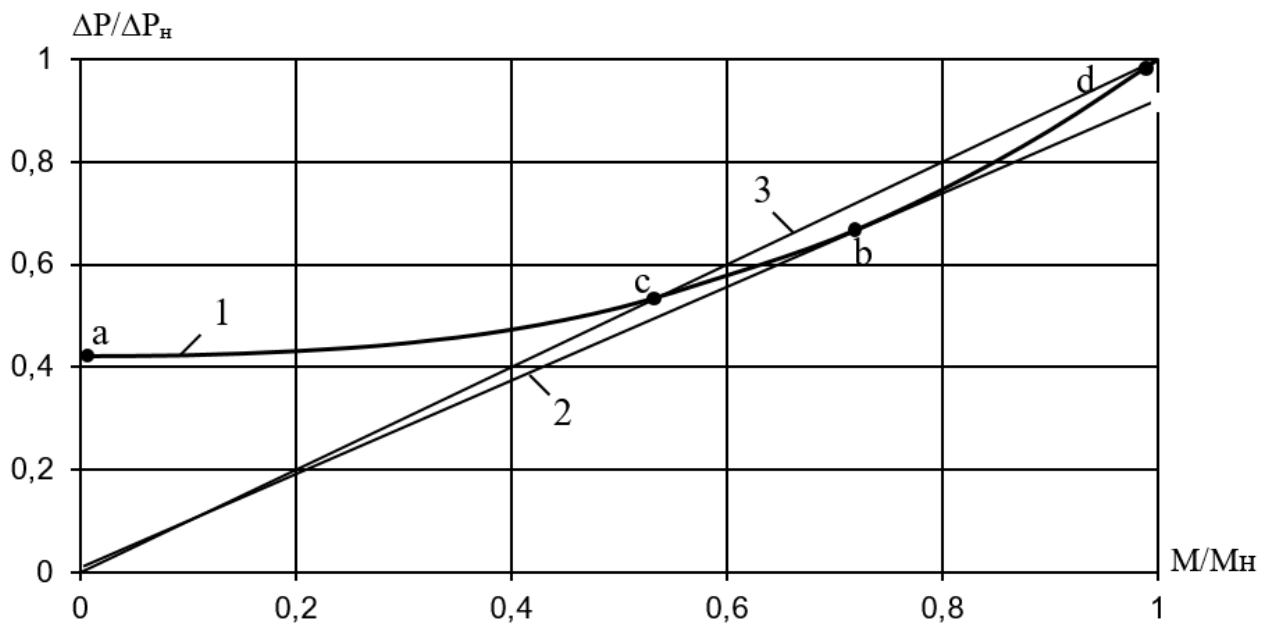


Рис. 5.2. Графики втрат потужності в 4АМУ100L4

Технічна реалізація режиму мінімізації втрат у сталому режимі можлива тільки у замкнутих електромеханічних системах. Причому використовувати зворотний зв'язок за ковзанням (швидкістю) недоцільно, оскільки робота АД відбувається при значеннях, близьких до номінального ковзання. Це висуває жорсткі вимоги до точності вимірюваної величини і не завжди виправдано. Найбільш перспективним є спосіб, заснований на властивості сталості коефіцієнта потужності в режимі мінімізації [41]. Сигналами ЗЗ, у цьому випадку, є кути запізнювання закінчення струмів статора АД - δ . За аналогією з оптимальним ковзанням для кожного АД існує кут $\delta_{\text{опт}}$, при роботі з яким втрати потужності будуть мінімальними. Він визначається

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\text{опт}} &= \arctg \frac{Q_{1н}}{P_{1гр}}, \\ P_{1гр} &= \omega_0 M_{гр} + \Delta P_{м1н} \frac{\Delta P_{0н}}{\Delta P_{нГн}} + \Delta P_{0н}, \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

де $Q_{1н}$ – номінальна реактивна потужність АД, Вар;
 $P_{1гр}$ – активна потужність, споживана АД, на природній характеристиці при навантаженні $M_c = M_{гр}$, Вт;
 $\Delta P_{м1н}$ – втрати в міді статора АД за номінального навантаження, Вт.

5.2. Синтез системи мінімізації втрат потужності

Функціональна схема електромеханічної системи мінімізації втрат потужності в АД (СМВ) зображена на рис. 5.3. До її складу входять:

- тиристорний перетворювач напруги (ТПН);
- асинхронний двигун (АД);
- формувач завдання (ФЗ), що задає сигнал керування у функції кута $\delta_{\text{опт}}$;
- канали керування фазами асинхронного двигуна (ККА, ККВ, ККС);
- канали зворотного зв'язку кожної з фаз (КЗЗА, КЗЗВ, КЗЗС).

До складу кожного з каналів керування входить ПІ-регулятор кута δ (РД) і система імпульсно-фазового керування – СІФК (рис. 5.4, а).

Кожен із каналів зворотного зв'язку містить у собі (рис.5.4,б):

- датчик кута δ (ДД), що вимірює кут запізнювання струму за кожну половину періоду напруги ТПН і перетворює значення кута в поточну напругу зворотного зв'язку $U_{ззА}(U_{ззВ}, U_{ззС})$;
- елемент пам'яті (ЕЛП), що зберігає значення напруги зворотного зв'язку, величина, якого оновлюється через інтервал часу $t = 0,01$ с.

Дія СМВ починається після закінчення перехідного процесу пуску АД. За симетричною напругою ДЖ, її принцип дії полягає в тому, що при зменшенні навантаження на валу АД (збільшення кута) дія зворотного зв'язку призводить до зменшення вихідної напруги тиристорного перетворювача.

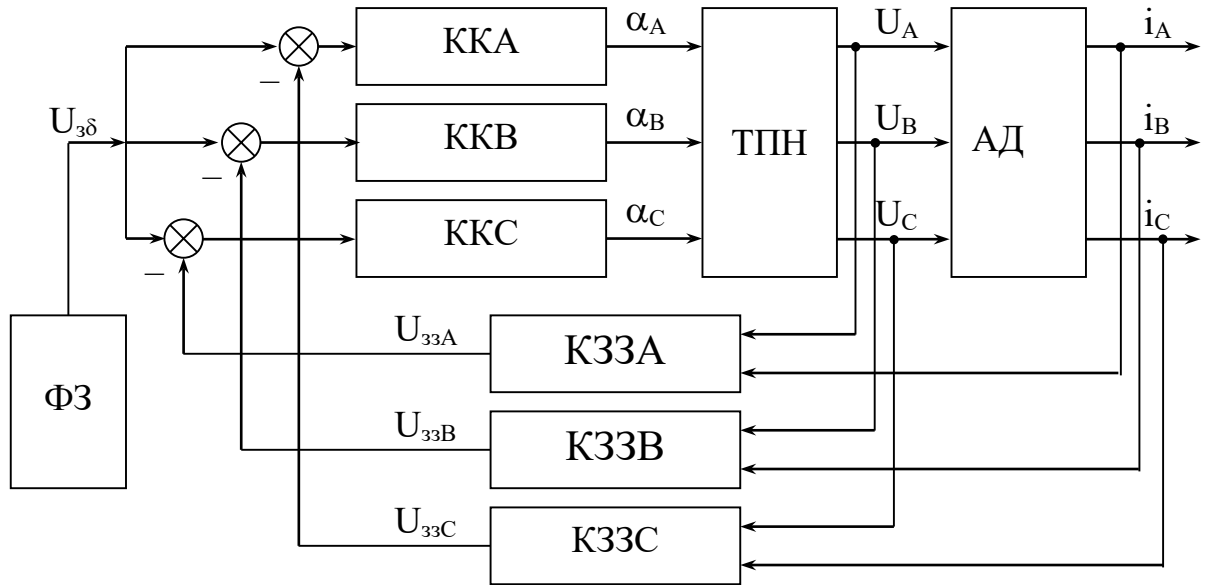


Рис. 5.3. Функціональна схема електромеханічної системи мінімізації втрат в АД

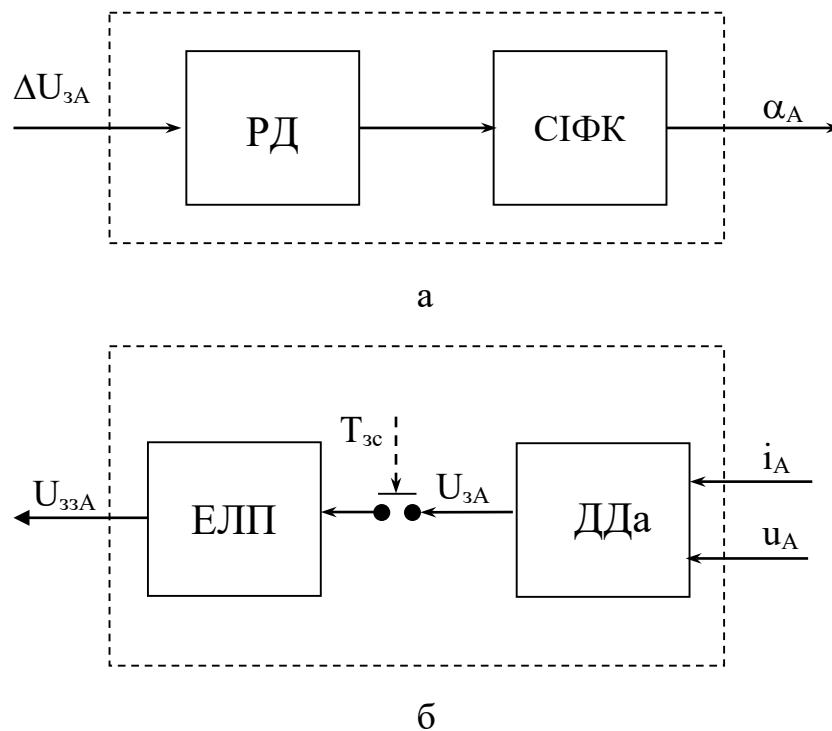


Рис. 5.4. Функціональні схеми: а – каналу керування та б – каналу зворотного зв'язку фази А системи мінімізації втрат

Зменшення напруги ТПН призводить до зменшення струмів статора АД. Внаслідок, вдається підтримувати рівність кутів δ оптимальному значенню $\delta_{\text{опт}}$. Це дає змогу вирішувати проблему мінімізації втрат в АД. Систему автоматичної мінімізації втрат потужності в АД можливо виконати на базі електропривода ТПН-АД, як з синхронізацією з напругою мережі, так і зі струмом навантаження. Основною відмінністю буде параметр СІФК, відносно якого здійснюється керування – α або γ . Дослідження роботи СМВ проводиться за допомогою моделювання. Розрахунок параметрів виконується для асинхронного двигуна 4АМУ90L4. Значення оптимального кута δ можна знайти на підставі (5.6 - 5.7) і параметрів енергетичної діаграми АД

$$M_{\text{гр}} = 14,8 \cdot \sqrt{\frac{187,3}{364,7}} = 10,6 \text{ Нм}; \quad (5.9)$$

$$P_{\text{1гр}} = 157 \cdot 10,6 + 304,7 \cdot \frac{187,3}{364,7} + 187,3 = 2007,9 \text{ Вт}; \quad (5.10)$$

$$\delta_{\text{опт}} = \text{arctg} \frac{1680,1}{2007,1} = 39,9 \text{ ел. град.} \quad (5.11)$$

Під час моделювання система імпульсно-фазового керування описується на підставі виразів, аналогічних (4.28 - 4.30). При цьому передавальні коефіцієнти СІФК визначаються за (4.29, 4.31), відповідно до ТПН з СН та з СС,

Для тиристорного перетворювача з синхронізацією зі струмом навантаження максимальне значення безструмової паузи становить: $\gamma_{\text{макс}} = 60$ ел. град.

Допускається, що канал зворотного зв'язку описується підсилювальною ланкою з коефіцієнтом передачі

$$K_{\text{зз}} = \frac{U_{\text{зз макс}}}{\delta_{\text{макс}}}, \quad (5.12)$$

де $U_{\text{зз макс}} = 10 \text{ В}$ – максимальна напруга зворотного зв'язку.

Кут $\delta_{\text{макс}}$ за звичайних умов роботи в першому квадранті не перевищує 90 ел. град, однак у разі суттєвої несиметрії напруги ДЖ його значення в окремих фазах можуть досягати 120 ел. град. [42].

Напругу формувача вхідного сигналу визначають, виходячи з умови рівності напруги завдання і напруги зворотного зв'язку при значенні кута δ , що дорівнює оптимальному значенню $\delta_{\text{опт}}$

$$U_{\text{з}\delta} = \delta_{\text{опт}} \cdot K_{\text{зз}}, \quad (5.13)$$

Для налаштування регуляторів можливо скористатися спрощеною розрахунковою структурною схемою, еквівалентною контуру регулювання кута δ однієї з фаз АД (рис. 5.5).

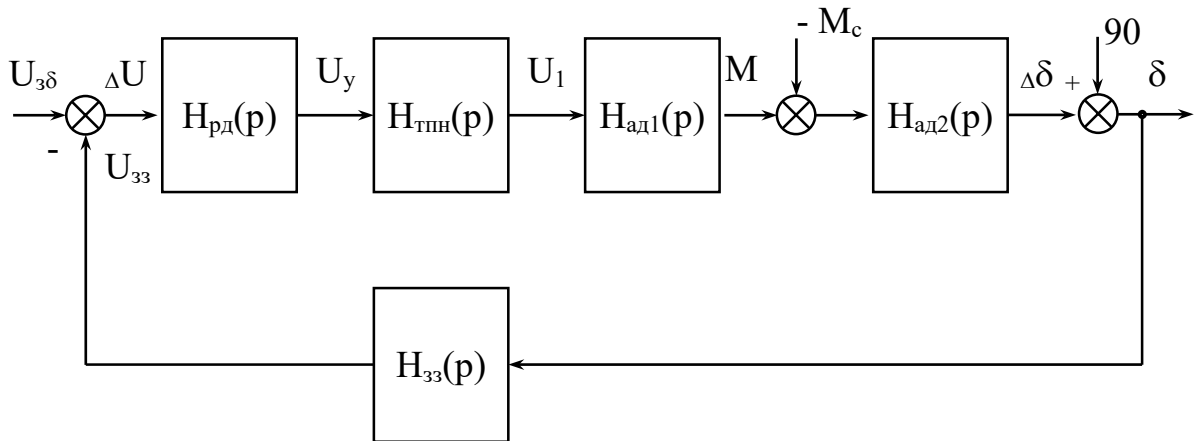


Рис.5.5. Розрахункова структурна схема контуру регулювання кута δ

Елементи структурної схеми описуються передавальними функціями:

$H_{\text{зз}}(p) = K_{\text{зз}}$ – передавальна функція каналу зворотного зв'язку;

$H_{\text{рд}}(p)$ – передавальна функція регулятора кута δ ;

$H_{\text{тпн}}(p) = \frac{K_{\text{тпн}}}{T_{\text{пн}}p + 1}$ – передавальна функція тиристорного перетворювача

напруги із системою імпульсно-фазового керування, де $K_{\text{тпн}}$ – коефіцієнт передачі ТПН.

Коефіцієнт передачі ТПН визначається через відношення максимальних значень величин на виході та вході пристрою

$$K_{\text{тпн}} = \frac{U_{1\text{макс}}}{U_{\text{у макс}}}, \quad (5.14)$$

де $U_{1\text{макс}}$ – максимальна напруга першої гармоніки вихідної напруги ТПН, В.

$T_{\pi} = 0,0133$ с. – еквівалентна постійна часу тиристорного перетворювача, системи імпульсно-фазового керування і каналу ЗЗ.

Спрощена еквівалентна передавальна функція електромагнітної складової АД записується [43]

$$H_{ад1}(p) = \frac{K_M}{T_{ад}p + 1}, \quad (5.15)$$

де K_M – коефіцієнт передачі за моментом АД;

$T_{ад}$ – еквівалентна електромагнітна постійна часу АД у номінальному режимі, с.

Постійна часу визначається на підставі виразу

$$T_{ад} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \operatorname{tg} \varphi_H. \quad (5.16)$$

де ω_0 – синхронна швидкість АД, 1/с.

Для випадку роботи АД на природній механічній характеристиці з номінальним моментом навантаження в разі лінеаризації "у великому", коефіцієнт передачі за моментом визначається

$$K_M = \frac{M_H}{U_{1 \max}}, \quad (5.17)$$

де $U_{1 \max}$ – максимальне значення напруги першої гармоніки ТПН, В.

Передавальна функція електромеханічної частини асинхронного двигуна, з урахуванням переходу до кута δ , має вигляд

$$H_{ад2} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \cdot K_{\delta}, \quad (5.18)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції електропривода, кг·м²;

K_{δ} – коефіцієнт передачі за кутом δ , визначається з аналітичних умов відповідності, наведених у табл. 5.1.

Вираз для розрахунку кута δ у разі лінеаризації робочої ділянки механічної характеристики має вигляд [43]

$$\delta = 90 - K_{\delta} \cdot \Delta\omega, \quad (5.19)$$

Таблиця 5.1

Умови визначення коефіцієнта передачі K_δ

$\omega = \omega_0$	$\Delta\omega = 0$	$\delta \approx 90$ ел. град.
$\omega = \omega_H$	$\Delta\omega = \Delta\omega_H$	$\delta = \varphi_H$

звідки

$$K_\delta = \frac{90 - \delta_H}{\Delta\omega_H}. \quad (5.20)$$

Розрахункову структурну схему можливо спростити, визначивши еквівалентну передавальну функцію ТПН і електричну складову АД [5]

$$H_{el}(p) = H_{тп}(p) \cdot H_{ад1}(p), \quad (5.21)$$

$$H_{el}(p) = \frac{K_{тп}}{T_{п}p + 1} \cdot \frac{K_{м}}{T_{ад}p + 1} = \frac{K_{тп} \cdot K_{м}}{T_{п}T_{ад}p^2 + T_{п}p + T_{ад}p + 1}, \quad (5.22)$$

Оскільки $T_{п} \cdot T_{ад}$ – добуток малих постійних часу, допускається, що $T_{п} \cdot T_{ад} p^2 \approx 0$, тоді еквівалентна передавальна функція має вигляд

$$H_{el}(p) = \frac{K_{тп} \cdot K_{м}}{T_e p + 1}, \quad (5.23)$$

де $T_e = T_{п} + T_{ад}$ – сумарна еквівалентна постійна часу, с.

Кожен із регуляторів кутів δ являє собою ПІ-регулятор, який описується передавальною функцією [44]

$$H_{р\delta}(p) = \frac{1}{K_{зз} \cdot 2 \cdot T_e \cdot K_\delta} \cdot J_\Sigma + \frac{1}{4 \cdot T_e p \cdot K_{зз} \cdot 2 \cdot T_e \cdot K_\delta} \cdot J_\Sigma = K_{п} + \frac{K_i}{p}, \quad (5.24)$$

де $K_{п}$ і K_i – коефіцієнти при пропорційній та інтегральній складових, відповідно.

Для досліджуваного двигуна 4АМУ90L4 розрахункові значення коефіцієнтів регуляторів кутів δ становлять: $K_{п} = 0,46$ і $K_i = 16,2$, відповідно.

5.3. Аналіз результатів мінімізації втрат потужності

Дослідження роботи системи мінімізації втрат проводилися за допомогою моделювання та експериментів для кількох асинхронних двигунів загальнопромислового виконання. Для кожного з АД (табл. 5.2.) було зроблено розрахунок умов зменшення втрат потужності та параметрів СМВ, що характеризують.

Таблиця 5.2

Характерні параметри досліджуваних АД

Типорозмір	P_1 , кВт	ΔP_{Σ} , кВт	$M_{гр}/M_n$, в.о.	$\delta_{опт}$, ел. град.
4АМУ90L4	2,2	0,58	0,72	39,9
АИРС132S6	6,3	1,87	1,07	45,7
4АР160М8	11,0	2,03	0,93	41,6
АМУ280М8	45,0	6,20	1,08	41,1

Для випадку живлення ТПН-АД від джерела із симетричною напругою результати мінімізації у вигляді графіків втрат в асинхронних двигунах наведено на рис. 5.6. Криві визначають втрати потужності в АД, виражені у відносних одиницях, під час роботи на природних і регульовальних характеристиках у режимі мінімізації за різних моментів навантаження. Чисельні значення результатів мінімізації втрат потужності в АД приведені у табл. 5.3. Дослідження показало схожі показники мінімізації втрат потужності в АД у разі застосування ТПН з різними принципами синхронізації. Однак, у замкнутій системі при застосуванні перетворювача з синхронізацією з напругою мережі для низки АД спостерігаються коливання, властиві розімкненим системам ТПН-АД (Розділ 3). Ця обставина дає підставу рекомендувати ТПН з СТ, як найкращий для застосування в СМВ.

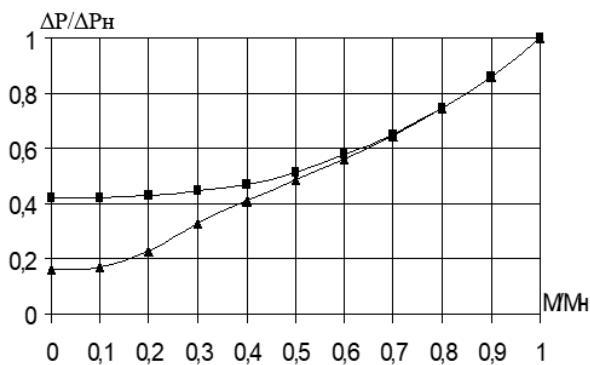
Таблиця 5.3

Результати мінімізації втрат потужності в АД

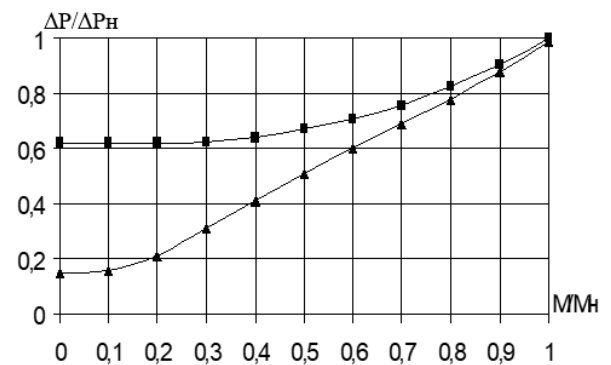
Типорозмір	$\Delta P/\Delta P_H$											
	0		0,2 M _H		0,4 M _H		0,6 M _H		0,8 M _H		1,0 M _H	
4АМУ90L4	0,42*	** 0,16	0,43	0,23	0,47	0,41	0,58	0,57	0,75	0,75	1	1,0
АИРС132S6	0,62	0,15	0,62	0,21	0,64	0,41	0,71	0,60	0,82	0,78	1	0,97
4АР160М8	0,51	0,17	0,52	0,25	0,55	0,42	0,63	0,59	0,77	0,76	1	1,0
АМУ280М8	0,54	0,18	0,55	0,23	0,60	0,45	0,67	0,61	0,80	0,79	1	0,97

* відносні втрати на природній механічній характеристиці;

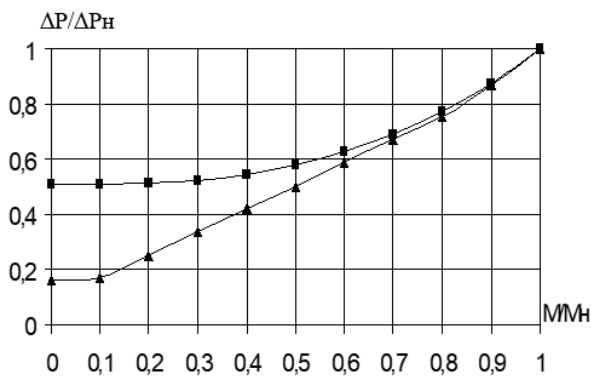
** відносні втрати на регульовальній механічній характеристиці.



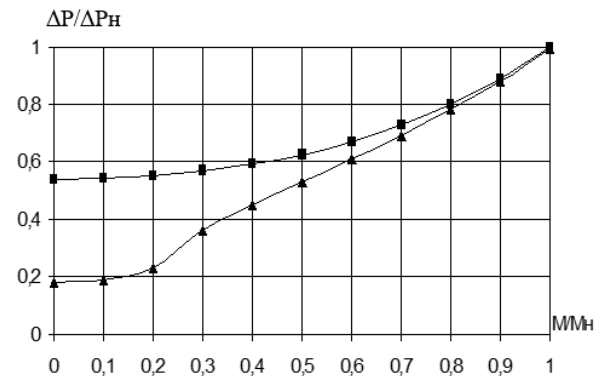
а - 4АМУ90L4



б - АИРС132S6



в - 4АР160М8



г - АМУ280М8

Рис.5.6. Графіки втрат потужності в асинхронних двигунах:

- на природній механічній характеристиці;
- ▲— на регульовальній оптимальній характеристиці.

Результати показують, що СМВ забезпечує значне зменшення втрат в АД у діапазоні робочих моментів $0 \leq M \leq M_{гр}$. Незначну розбіжність між значеннями граничних моментів (3-5%), отриману при моделюванні та експериментами, можна пояснити прийнятими припущеннями щодо лінійності механічних характеристик АД (рис. 5.2). Відмінність оптимальних регулювальних характеристик, отриманих під час моделювання, від ідеальних розрахункових пояснюється нелінійністю параметрів досліджуваних асинхронних машин [45]. Нелінійність оптимальних характеристик в області малих навантажень і відсутність перетину з початком координат зумовлено природними обмеженнями ТПН у режимах, близьких до холостого ходу.

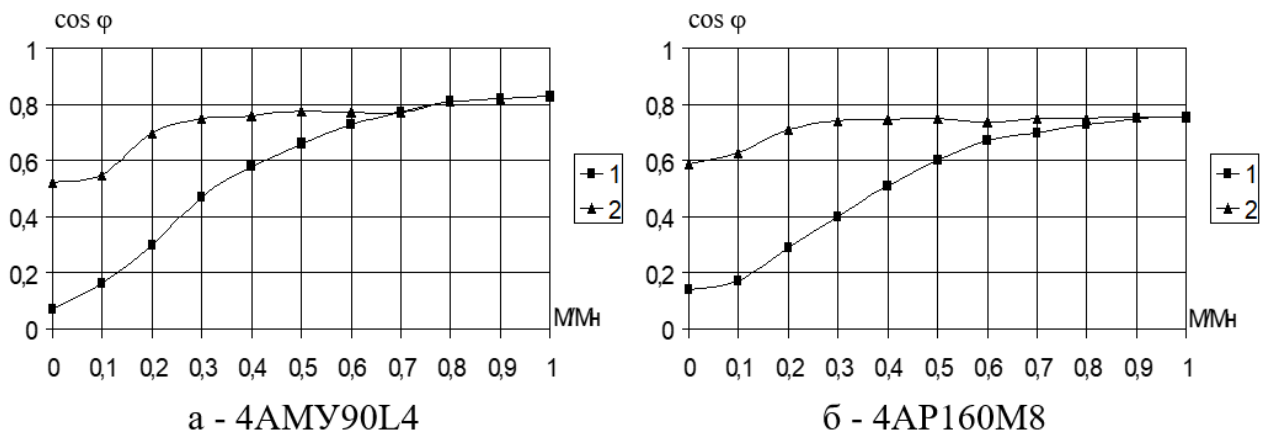


Рис. 5.7. Графіки залежностей коефіцієнта потужності від навантаження АД на: 1 – природній характеристиці; 2 – регулювальній характеристиці

Найбільший ефект режим мінімізації втрат дає в тих випадках, коли енергетичні показники асинхронних двигунів через їхню специфіку виявляються невисокими. Твердження про те, що режим мінімізації втрат можливий тільки в області моментів навантаження $0 \leq M \leq (0,4 \dots 0,6) M_n$ вірні і відносяться до АД нормального виконання, причому з "хорошою" енергетикою [40]. Водночас існує значна кількість АД, для яких значення граничних моментів $M_{гр}$ перебувають у діапазоні $0,6 \dots 2,0 M_n$. Це стосується насамперед двигунів із низькими значеннями коефіцієнтів корисної дії та коефіцієнтів потужності: багатополюсних, із підвищеним ковзанням,

пусковим моментом, збільшеним повітряним зазором тощо. Це підтверджується результатами дослідження. Найкращі показники щодо поліпшення енергетичних показників АД спостерігаються в режимі ХХ і за малих моментів навантаження. Це виражається у зменшенні сумарних втрат, за рахунок зменшення втрат потужності в АД на намагнічування завдяки зменшенню напруги на статорі. Зниження втрат на намагнічування призводить до зменшення споживаної АД реактивної потужності, а отже, до збільшення коефіцієнта потужності. Під час роботи у складі СМВ асинхронні двигуни позбуваються одного з головних своїх недоліків – істотного зменшення коефіцієнта потужності при зменшенні навантаження [46]. Для досліджуваних АД за малих навантажень спостерігається збільшення коефіцієнтів потужності більш ніж удвічі, що підтверджують графіки залежностей коефіцієнта потужності від навантаження АД, приведені на рис. 5.7.

РОЗДІЛ 6

МІНІМІЗАЦІЯ ВТРАТ В АД ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ДЖЕРЕЛА З НЕСИМЕТРИЧНОЮ НАПРУГОЮ

6.1. Особливості режиму мінімізації втрат в умовах несиметричного живлення

Встановлено, що в явному вигляді, розглянутий у Розділі 5 режим мінімізації втрат, не дає ефекту симетрування [13]. Разом з тим, симетрування струмів статора призводить до значного поліпшення енергетичних показників АД (Розділ 4), однак, системи автоматичного симетрування не інваріантні до зміни навантаження [15]. Системи мінімізації втрат припускають використання їх при симетричних за фазами параметрах ДЖ і АД. У подібних СМВ використовується один регулятор, і застосовується симетричне керування і регулювання тиристорів ТПН [47]. В умовах несиметрії напруги ДЖ необхідно застосовувати роздільне пофазне керування, що зумовлює застосування трьох каналів керування і зворотного зв'язку (5.3). Це дає змогу розв'язувати проблему мінімізації втрат потужності в АД за рахунок рівності кутів навантаження оптимальному куту δ_{opt} , і отримувати ефект симетрування за рахунок рівності кутів δ у фазах АД. При цьому кути включення вентилів тиристорного перетворювача принципово не симетричні. При живленні від джерела з несиметричною напругою основні принципи роботи електромеханічної системи мінімізації втрат зберігаються. Результати мінімізації зручно представити у вигляді гістограм відносних втрат потужності в АД для декількох значень коефіцієнтів несиметрії напруги. При цьому робота АД на основній характеристиці та на регулювальній у складі СМВ. Гістограми зображені на рис. 6.1, 6.2. У цьому разі під основною мається на увазі характеристика, на якій працює АД у разі несиметричної напруги ДЖ і з кутом керування ТПН $\alpha = 0$. Так само на рис. 6.1, 6.2 приведені гістограми відносних втрат, отримані в при роботі системи автоматичного симетрування струмів АД (рис. 4.9) для тих самих умов.

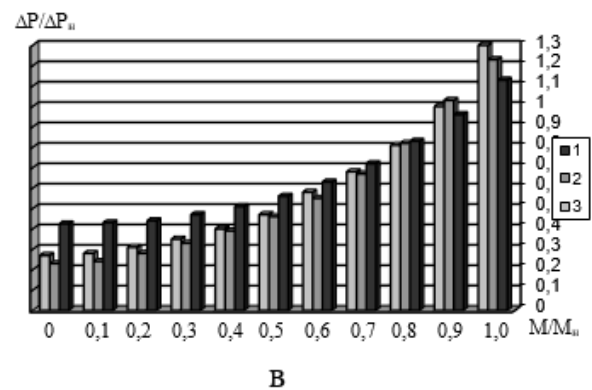
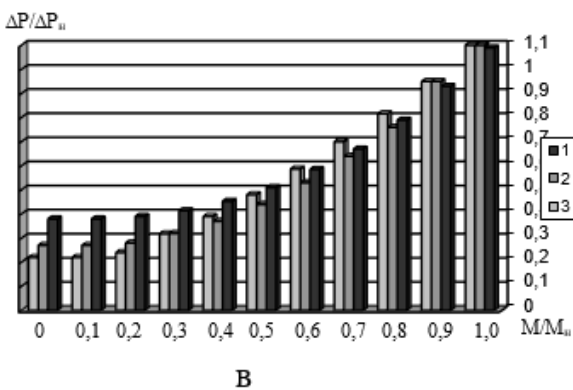
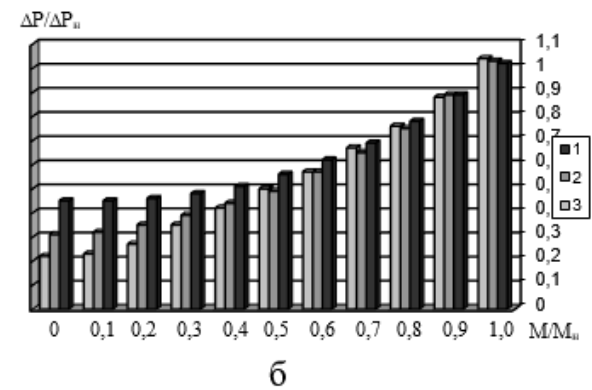
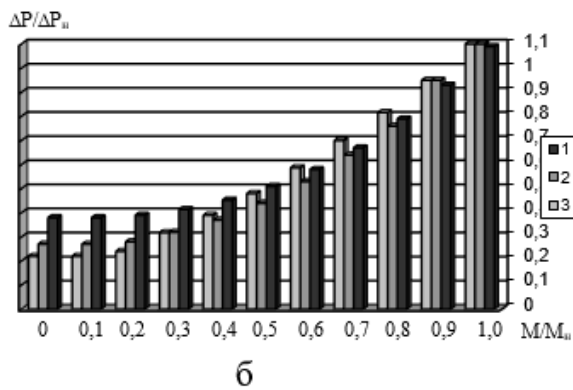
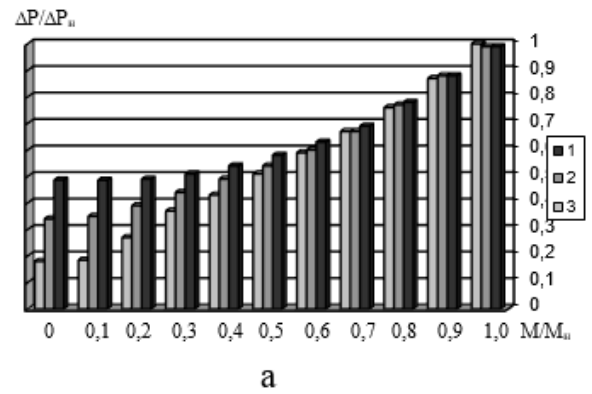
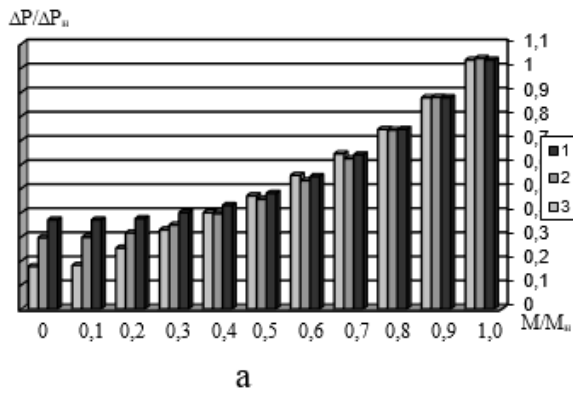


Рис. 6.1. Гістограми відносних втрат потужності в АД 4AMU90L4 при несиметрії ДЖ:

а - $K_u = 2,5\%$; б - $K_u = 5\%$; с - $K_u = 10\%$;

1 – на основній характеристиці;
 2 – на регульовальній характеристиці в режимі симетрування;
 3 – на регульовальній характеристиці в режимі мінімізації втрат.

Рис. 6.2. Гістограми відносних втрат потужності в АД АМУ280М8 при несиметрії ДЖ:

а - $K_u = 2,5\%$; б - $K_u = 5\%$; с - $K_u = 10\%$;

1 – на основній характеристиці;
 2 – на регульовальній характеристиці в режимі симетрування;
 3 – на регульовальній характеристиці в режимі мінімізації втрат.

При несиметрії напруги живлення, яка визначається коефіцієнтами $K_u < 5$ - 7%, система мінімізації втрат забезпечує найкращі показники зменшення втрат потужності для всіх досліджуваних двигунів, що особливо показово за умовою невеликих моментів навантаження. При істотній несиметрії, що перевищує гранично-допустиме значення більш ніж у 2 рази ($K_u > 8\%$), для двигунів середньої та великої потужності (наприклад АМУ280М8) система автоматичного симетрування струмів АД найефективніша.

Зі збільшенням несиметрії з $K_u > 2\%$, спостерігається деяке зменшення граничних моментів у середньому на 5 - 20%, відносно розрахункового граничного $M_{гр}$ при симетричному режимі. Залежно від типу АД і величини несиметрії. Дуже важливо, що режим мінімізації починається за моментів навантаження більших за значення розрахункового $M_{гр}$. Це значення моментів позначаються як моменти початку роботи системи – $M_{поч}$. Втрати у діапазоні навантаження $M_{гр} \leq M \leq M_{поч}$ перевищують втрати на основній характеристиці, причому кількісні показники цього перевищення визначаються типом АД, величиною несиметрії і поточним навантаженням на валу. Що більша несиметрія джерела живлення, то за більших значень моментів навантаження починається режим мінімізації. Для більшості досліджуваних АД за несиметрією, яка визначається коефіцієнтами $K_u \leq 3\%$, дисперсія втрат під час роботи АД на основній і регульовальній характеристиках не перевищує 5%. При несиметрії напруги з $K_u > 4...5\%$ значення моментів навантаження, за яких починається робота СМВ, досягають і перевищують значення номінальних моментів АД. Якщо теоретично допустити роботу АД з цим навантаженням, дисперсія втрат може становити 20% і більше.

Робота СМВ в умовах живлення від джерела з несиметричною напругою дає змогу не тільки мінімізувати втрати потужності в АД, а й отримати ефект симетрування, властивий системам автоматичного симетрування. Це ілюструють осцилограми швидкості та струмів статора двигуна 4АМУ90L4 в режимі мінімізації втрат при несиметричному живленні, зображені на рис. 6.3.

У проміжку часу $0 \leq t < 0,2$ с. двигун 4АМУ90L4 отримує живлення від ТПН і працює на основній характеристиці з моментом навантаження $M = 0,2M_n$, сумарним моментом інерції $J_\Sigma = 2J_d$. Несиметрія напруги живлення визначається $K_u = 5\%$. Час $t = 0,2$ с. відповідає початку мінімізації втрат. Подальша робота СМВ призводить до значного зменшення проявів несиметрії джерела живлення. Це дає право стверджувати, що рівність кутів δ за фазами АД призводить до "вирівнювання" значень діючих струмів статора і дає змогу розв'язувати проблему спільної мінімізації втрат потужності в АД та симетрування [48]. Для всіх досліджуваних двигунів за моментів навантаження $0 \leq M \leq M_{гр}$ спостерігається зменшення коливань швидкості, як прояв несиметрії. Це зумовлено зменшенням складової робочого моменту АД, частота якої становить сто герц. Найбільший ефект досягається при несиметрії ДЖ, що визначається коефіцієнтами $K_u < 4 - 5\%$, а саме зменшення на 20 - 300%. За більшої несиметрії показники дещо гірші. Показники симетрування струмів статора АД, виражені у зміні коефіцієнтів несиметрії на прикладі двигуна 4АМУ90L4, представлені в табл. 6.1 і на рис. 6.4.

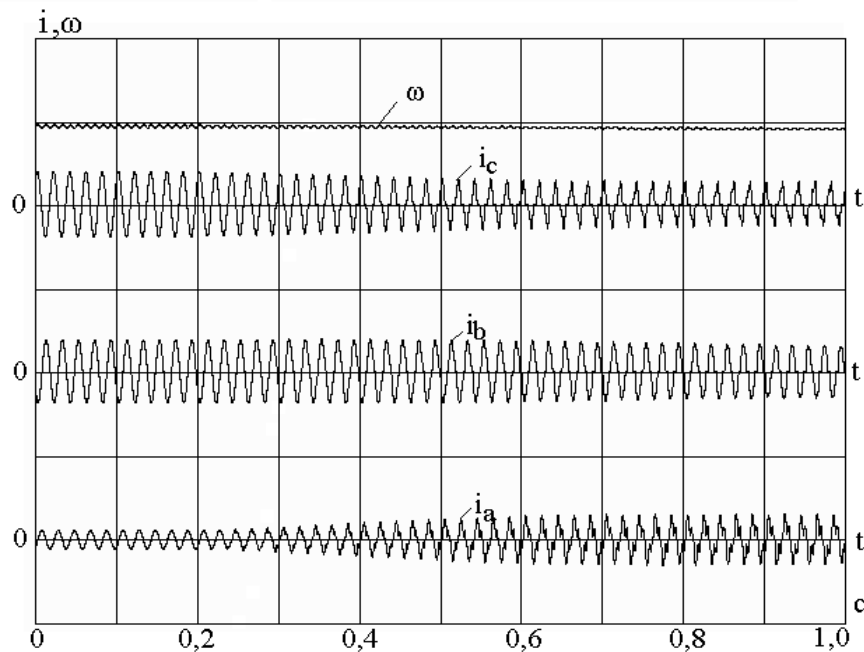


Рис. 6.3. Осцилограми швидкості та струмів статора двигуна 4АМУ90L4 в режимі мінімізації втрат

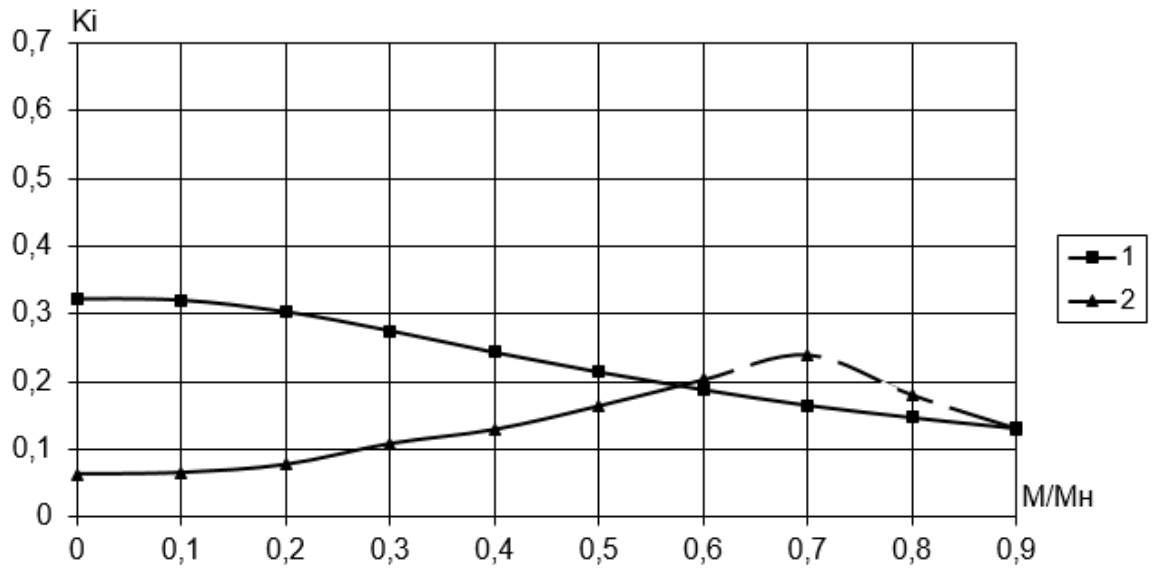
Таблиця 6.1

Показники симетрування струмів АД

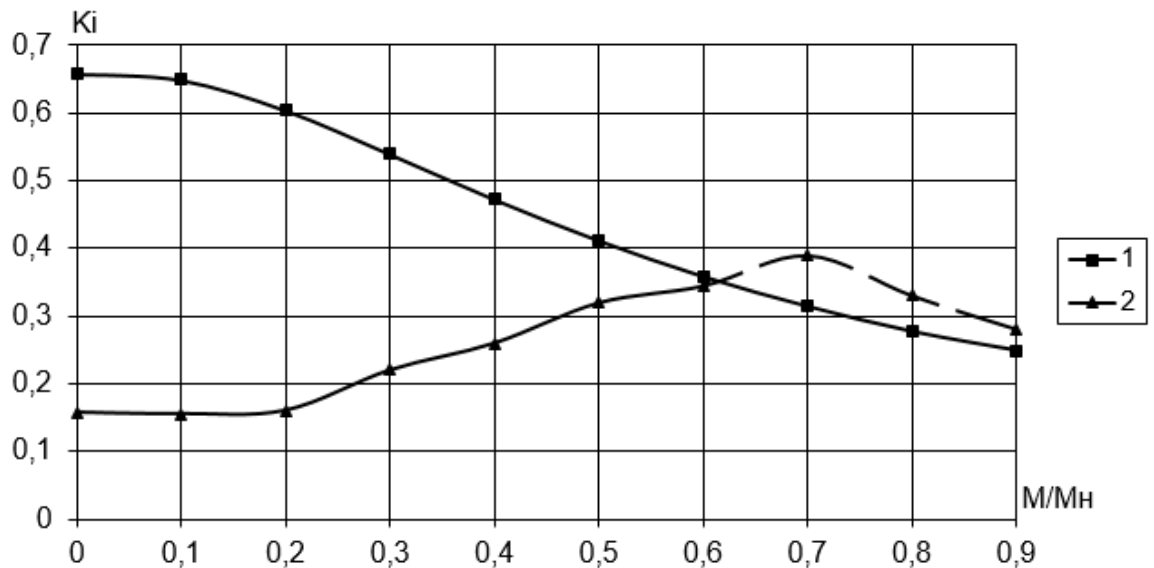
M_c/M_H	$K_u = 2,5\%$		$K_u = 5\%$		$K_u = 10\%$	
	$K_{i_o}^*$	$K_{i_{СМВ}}^{**}$	K_{i_o}	$K_{i_{СМВ}}$	K_{i_o}	$K_{i_{СМВ}}$
0,9	0,131	0,131	×	×	×	×
0,8	0,147	0,180	×	×	×	×
0,7	0,165	0,240	0,314	0,390	×	×
0,6	0,188	0,191	0,358	0,345	0,678	0,686
0,5	0,214	0,164	0,411	0,321	0,767	0,686
0,4	0,243	0,129	0,472	0,262	0,922	0,722
0,3	0,275	0,108	0,539	0,221	1,083	0,779
0,2	0,303	0,077	0,604	0,160	1,257	0,810
0,1	0,320	0,065	0,649	0,155	1,398	0,831
0	0,322	0,063	0,658	0,157	1,456	0,830

* K_{i_o} – коефіцієнт несиметрії струмів в ТПН-АД; ** $K_{i_{СМВ}}$ – коефіцієнт несиметрії струмів АД в замкнутій СМВ; × – тривала робота ТПН-АД неможлива за умовою нагрівання.

За моментів навантаження менших за граничний момент, коефіцієнти несиметрії струмів АД зменшуються. Найбільший ефект симетрування досягається під час роботи в режимах, близьких до ідеального холостого ходу. Значення граничних моментів зменшуються і становлять не більше $(0,57 - 0,62)M_H$. Моменти початку режиму симетрування за різної величини несиметрії ДЖ становлять, відповідно: $K_u = 2,5\%$, $M_{\text{поч}} \approx 0,88M_H$; $K_u = 5\%$, $M_{\text{поч}} \approx 0,96M_H$; $K_u = 10\%$, $M_{\text{поч}} > M_H$. Фізичний процес відсутності переходу на основну механічну характеристику при навантаженнях, що перевищують граничний момент $M_{\text{гр}}$, пояснюється істотною нерівністю кутів δ за фазами АД в умовах несиметрії напруги живлення. У той час, як кути δ двох фаз не перевищують значення $\delta_{\text{опт}}$, кут третьої фази може бути від самого початку більшим за це значення. Це призводить до початку роботи каналів зворотного зв'язку та управління цієї фази і як наслідок всієї СМВ загалом. Як і в дослідженнях втрат потужності, за моментів навантаження $M_{\text{гр}} \leq M \leq M_{\text{поч}}$ робота системи мінімізації втрат потужності призводить до збільшення несиметрії струмів АД (див. рис. 6.4).



а



б

Рис. 6.4. Залежності коефіцієнтів несиметрії струмів двигуна 4АМУ90L4 при роботі: а) $K_u = 2,5\%$; б) $K_u = 5\%$;

1 – на основній механічній характеристиці;

2 – на регульовальній характеристиці в режимі мінімізації втрат.

Ці обставини дають змогу, для двигунів з "хорошою" енергетикою, розширювати діапазон моментів навантаження, за яких можлива тривала робота АД, тільки за умови істотної несиметрії напруги ДЖ. Так, для асинхронного двигуна 4АМУ90L4 при несиметрії напруги з коефіцієнтом $K_u = 10\%$, робота СМВ забезпечує верхню межу можливих робочих моментів навантаження на рівні, близькому до $M_{гр} \approx 0,62M_n$. У разі несиметрії з $K_u < 8\%$ режим мінімізації втрат, навпаки, призводить до обмеження діапазону робочих моментів АД [48]. Перевищення навантаження граничного значення $M_{гр}$ призведе до спрацьовування теплового захисту АД і його відключення. Для двигунів з "поганою" енергетикою ці проблеми не актуальні, оскільки в них значення граничних моментів, що відповідають початку режиму мінімізації втрат і симетруванню струмів, відносно великі. Перехід на основну характеристику, за допомогою системи керування, не вирішує завдання симетрування, однак у разі несиметрії, з $K_u < 5-7\%$ виявляється корисним. СМВ корисно доповнити логічним блоком, який дає дозвіл на початок роботи усіх каналів зворотного зв'язку тільки у разі перевищення поточного значення опорної напруги $U_{оп}$ значення напруги формувача завдання $U_{з\delta}$. Напруга завдання фіксована і відповідає оптимальному куту $\delta_{опт}$. Формування напруги завдання можливо здійснити кількома способами. Усі вони передбачають поточний контроль вихідних величин ЕП. Можна запропонувати спосіб, який ґрунтується на контролі обертального моменту АД і формуванні контрольної опорної напруги $U_{оп}$ на підставі поточного значення моменту. Контроль моменту в статичному режимі роботи досить просто можна здійснити за допомогою вимірювання струмів статора АД з подальшим знаходженням моменту (2.30). Так само в регульованих асинхронних ЕП можливе застосування датчиків непрямої дії, принципи побудови яких засновані на вимірюванні споживаної активної потужності або потужності на валу [49]. Але, оскільки вимірювання моменту АД тягне за собою застосування додаткових пристроїв і ускладнення СМВ, актуальним є питання реалізації переходу на основну характеристику за допомогою вже наявних засобів [50]. Найпростішим є спосіб, що ґрунтується на

врахуванні кутів δ усіх трьох фаз АД.

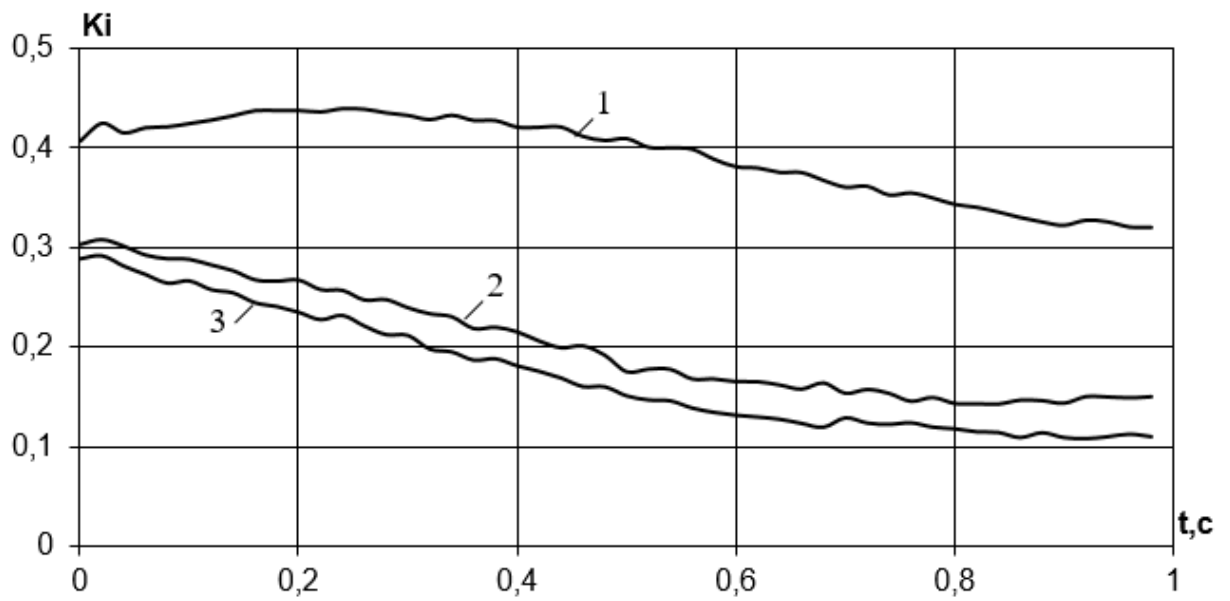
Значення опорної напруги формується з поточних напруг зворотного зв'язку за кутом δ на підставі виразу

$$U_{\text{оп}} = \frac{U_{\text{зз А}} + U_{\text{зз В}} + U_{\text{зз С}}}{3} \quad (6.1)$$

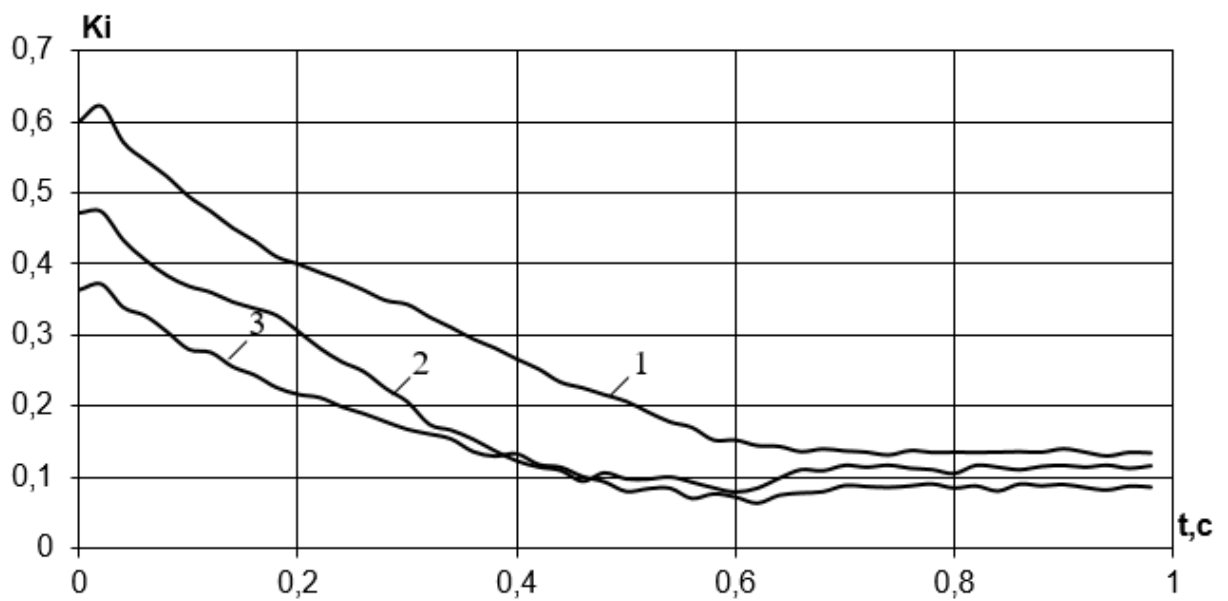
Для всіх досліджуваних двигунів, за умови несиметрії напруги ДЖ з коефіцієнтами $K_u \leq 5\%$, опорна напруга, що формується на підставі (6.1) починає перевищувати напругу завдання. Це фіксується для навантажень близьких до значень відповідних граничних моментів. При навантаженнях більших значення граничного моменту $M_{\text{гр}}$, канали зворотного зв'язку СМВ не працюють, а АД працює на основній механічній характеристиці. Уявлення про поведінку системи мінімізації втрат у динаміці дають залежності зміни коефіцієнтів несиметрії струмів АД у часі, зображені на рис. 6.5. Представлені характеристики відповідають роботі ЕП з несиметрією напруги ДЖ, що визначається $K_u = 5\%$ і навантаженням з моментами $M_c = 0,5M_n$ та $M_c = 0,2M_n$, для деяких досліджуваних двигунів. Швидкодія СМВ, що визначає час мінімізації втрат потужності в АД і одночасне симетрування струмів, при фіксованих параметрах регуляторів у граничних випадках не перевищує 0,8 – 1 с. Деяке початкове збільшення коефіцієнтів несиметрії струмів АД пояснюється впливом пропорційної складової регуляторів і є аналогом перерегулювання в замкнутих системах автоматичного керування.

За моментів навантаження, які рівні між собою або дещо менші значення граничного моменту $M_{\text{гр}}$, під час перехідного процесу спостерігається збільшення коефіцієнтів несиметрії струмів АД (рис. 6.5,а, крива – 1). Це збільшення не зумовлене збільшенням діючих струмів у найбільш навантажених фазах АД, є короткочасним, не перевищує 5 - 10% і, як наслідок, не становить серйозної проблеми для роботи ТПН-АД.

6.3. Питання апаратної реалізації системи мінімізації втрат потужності та синтез алгоритму її роботи



а



б

Рис. 6.5. Залежності коефіцієнтів несиметрії струмів АД у часі при навантаженнях: а) $M_c = 0,5M_n$; б) $M_c = 0,2M_n$ для двигунів: 1 - 4АМУ90L4;

Зростання інтеграції в мікропроцесорній техніці практично повністю зумовило перехід від мікропроцесорів з низкою зовнішніх структур до універсальних комплектних мікроконтролерів (МК) з вбудованим набором периферійних пристроїв. Комплектні мікроконтролери дають змогу забезпечувати не тільки пряме введення сигналів різних зворотних зв'язків (незалежно від типу сигналів) з подальшим програмно-апаратним опрацюванням усередині мікроконтролера, а й, у низці випадків, здійснювати безпосереднє керування кожним ключем силового перетворювача [51]. У загальному випадку, функціональна схема системи мінімізації втрат з керуванням від мікроконтролера зображена на рис. 6.6.

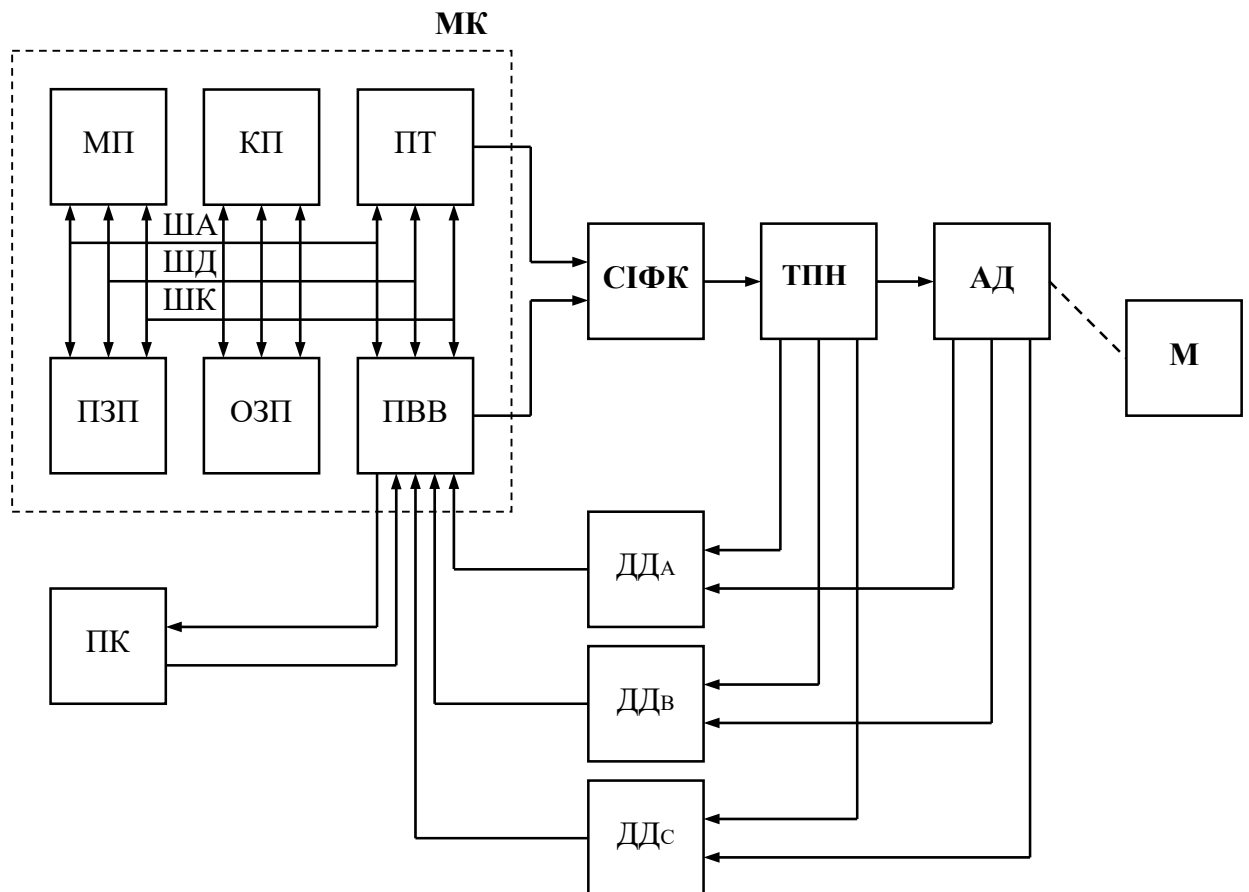


Рис. 6.6. Функціональна схема системи мінімізації втрат потужності

На схемі показано:

МК – мікроконтролер, який має у своєму складі: МП – мікропроцесор; КП – контролер переривань; ПТ – програмовані таймери; ПЗП – постійний запам'ятовувальний пристрій; ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій; ПВВ – пристрої введення-виведення; ША, ШД, ШК – шина адреси, шина даних, шина керування.

Також у складі:

СІФК – система імпульсно-фазового керування; ТПН – тиристорний перетворювач напруги; АД – асинхронний двигун; М – приводний механізм; ДДА, ДДВ, ДДС – датчики кутів дельта фаз А, В, С, відповідно; ПК – пульт керування.

На мікропроцесорну систему керування покладаються основні функції [52]

- розрахунок оптимального кута $\delta_{\text{опт}}$ залежно від параметрів двигуна і формування задавального сигналу U_3 на підставі розрахунку $\delta_{\text{опт}}$;
- розрахунок параметрів і виконання функцій регуляторів кутів δ з формуванням сигналів керування;
- оновлення сигналів зворотних зв'язків і зберігання їх значень протягом півперіоду напруги джерела живлення;
- управління напругою кожної фази ТПН у функції розрахункового кута $\delta_{\text{опт}}$ і поточних сигналів зворотного зв'язку;
- контроль роботи системи мінімізації втрат шляхом обміну інформацією з пультом керування.

Програмний алгоритм роботи системи мінімізації втрат ТПН-АД представлено на схемі рис. 6.7. Робота системи починається з подачі оператором сигналу з ПК або автоматично, після завершення динамічного режиму ЕП. З поданням команди на початок роботи МП виконує діагностику всіх елементів СМВ. Якщо виявлено несправність, то інформація про неї надходить на пульт керування оператора, а електропривод автоматично відключається [52].

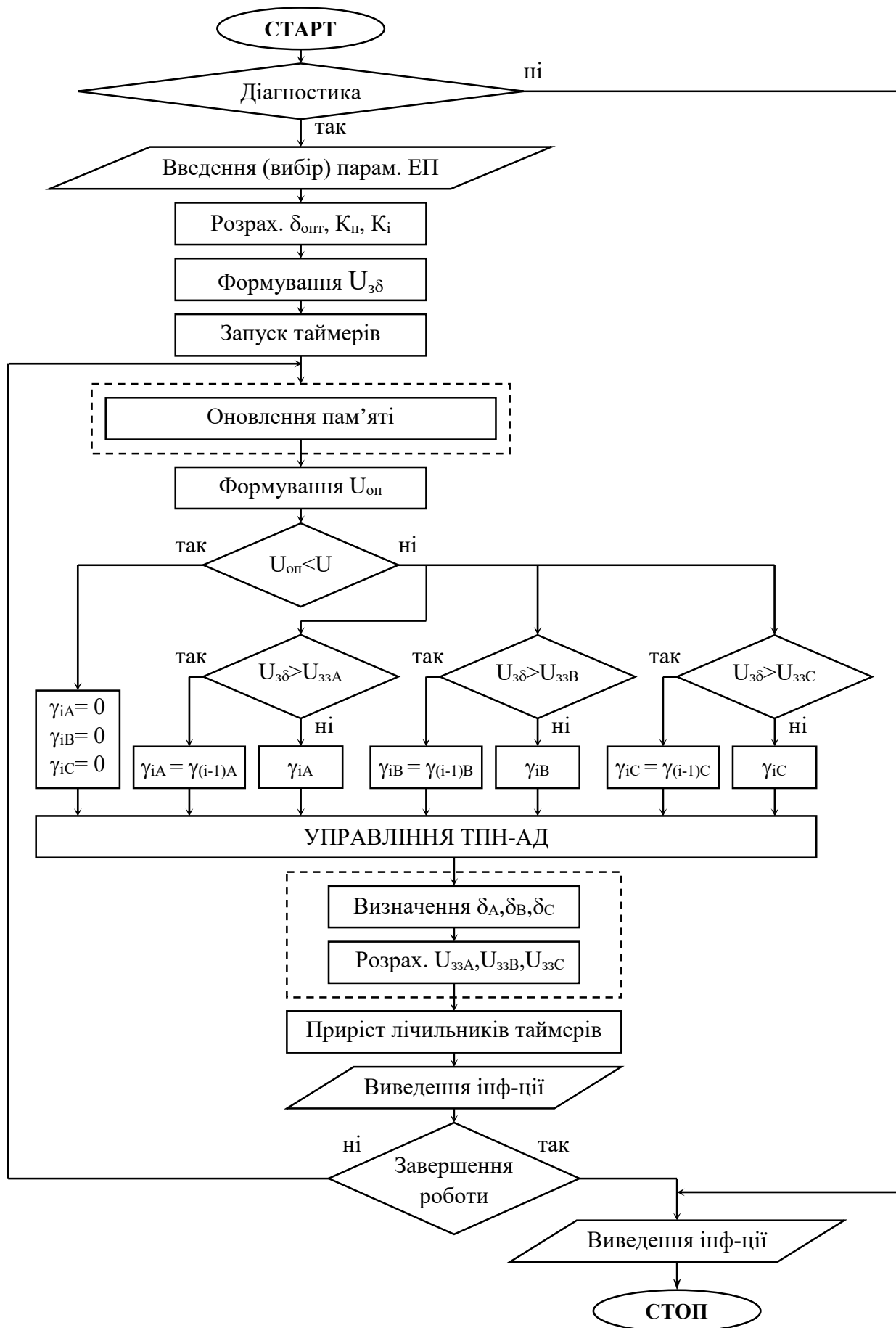


Рис. 6.7. Схема алгоритму роботи СМВ

Дозвіл на повторне ввімкнення дає оператор після з'ясування причин і усунення несправності. Якщо контроль виконано успішно, оператору необхідно з ПУ ввести (або вибрати з наявних) параметри електроприводу, необхідні для розрахунку мікропроцесором оптимального кута $\delta_{\text{опт}}$ і параметрів регуляторів кутів δ . Ця операція типова і виконується, як правило, під час першого запуску системи керування. У разі подальших запусків СМВ та умови незмінності елементів силової частини ЕП, ця функція виконується автоматично без участі оператора [53]. Після розрахунку оптимального кута δ виконується формування напруги сигналу завдання $U_{3\delta}$. Відбувається запуск лічильників таймерів, необхідних для відліку інтервалів часу. Сигнали зворотних зв'язків, що формуються датчиками кутів δ , оновлюються за час, що дорівнює напівперіоду напруги ДЖ. Це обумовлює паузу на початку процесу регулювання напруги, яка дорівнює $t = 0,01$ с. По закінченню цього інтервалу часу датчиками визначається інформація про поточні величини кутів δ , на підставі якої формуються напруги зворотних зв'язків U_{33A} , U_{33B} , U_{33C} . Ці значення заносяться в елементи пам'яті і зберігаються протягом подальшого інтервалу часу $t = 0,01$ с. У 5.3 обґрунтовано необхідність переходу на основну робочу характеристику (у разі несиметрії напруги ДЖ і навантаженнях, більших за граничний момент). Для цього в алгоритмі роботи СМВ реалізовано формування опорної напруги $U_{\text{оп}}$. Значення опорної напруги $U_{\text{оп}}$ порівнюється з напругою завдання $U_{3\delta}$. Якщо умова $U_{\text{оп}} < U_{3\delta}$ виконується, то значення безструмових пауз фаз ТПН із синхронізацією зі струмом навантаження приймають нульові значення. Слідую заборона на регулювання напруги і перехід АД на основну характеристику. Якщо умова не виконується, обмеження у роботі СМВ не потрібне.

Наступною процедурою алгоритму роботи є перевірка умов: $U_{3\delta} > U_{33A}$, $U_{3\delta} > U_{33B}$ и $U_{3\delta} > U_{33C}$. Якщо напруга завдання $U_{3\delta}$ перевищує поточну напругу зворотного зв'язку, то напруга завдання приймає нульове значення. Це відповідає тому, що поточне значення безструмової паузи γ_i СІФК не змінюється і відповідає значенню на попередньому кроці $\gamma_{(i-1)}$, що справедливо для кожної з фаз. Якщо умова $U_{3\delta} > U_{33}$ у будь-якій з фаз не виконується, то формуються

сигнали керування, які визначають поточні значення безструмових пауз γ_i . Після формування керуючих імпульсів СІФК, що відповідають безструмовим паузам γ у кожній з трьох фаз, здійснюється регулювання напруги ТПН-АД. Виконується прирощення лічильників таймерів і виведення інформації про поточний стан параметрів ЕП на пульт керування. Відлік часу таймерів здійснюється до завершення роботи СМВ. Переривання роботи системи може виконуватися оператором, системою діагностики або у разі спрацьовування одного із захистів ЕП. Після завершення роботи СМВ інформація про її стан виводиться на ПУ. Якщо робота ЕП не завершується, цикл повторюється, до того ж напруги зворотних зв'язків в елементах пам'яті оновлюються не після кожного збільшення лічильників таймерів, а після закінчення інтервалу часу $t = 0,01$ с.

Структура і складність алгоритму керування можуть зазнавати змін залежно від функціональних можливостей елементів системи. Наприклад, якщо забезпечити контроль параметрів електропривода в кожен з моментів часу, що відповідають приросту лічильників таймерів, то слід застосувати адаптивні регулятори кутів δ . У цьому разі параметри регуляторів будуть не фіксовані, а розраховуватимуться мікропроцесором після кожного приросту часу. Як вже зазначалося, це дасть можливість ще підвищити швидкодію [54].

6.3. Електромеханічна система мінімізації втрат, як джерело вищих гармонік

Запропонована електромеханічна система мінімізації втрат потужності має у складі ТПН, який є джерелом струму вищих гармонік (ВГ). Вищі гармоніки чинять негативний вплив на систему електропостачання (СЕП) та шкідливі для інших споживачів, що проявляється в спотворенні кривої напруги СЕП і її несинусоїдальності [14]. Несинусоїдальність напруги характеризується коефіцієнтом несинусоїдальності $K_{нс}$, %. Він, у свою чергу, визначається відношенням значення діючої напруги вищих гармонік U_v до напруги основної частоти U_1 або номінальної напруги

$$K_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_v^n U_v^2}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \cong \frac{\sqrt{\sum_v^n U_v^2}}{U_1} \cdot 100, \quad (6.2)$$

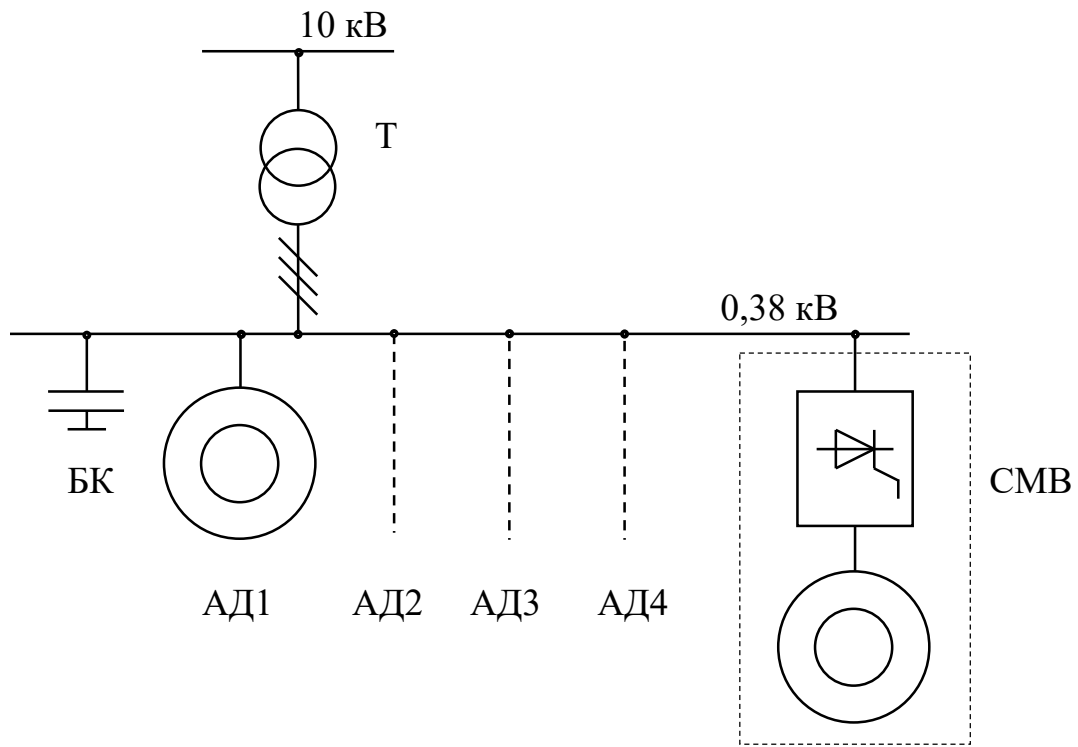
де U_v – діюча напруга v -ї гармоніки, В;

n – номер останньої з враховуваних гармонік, в.о.

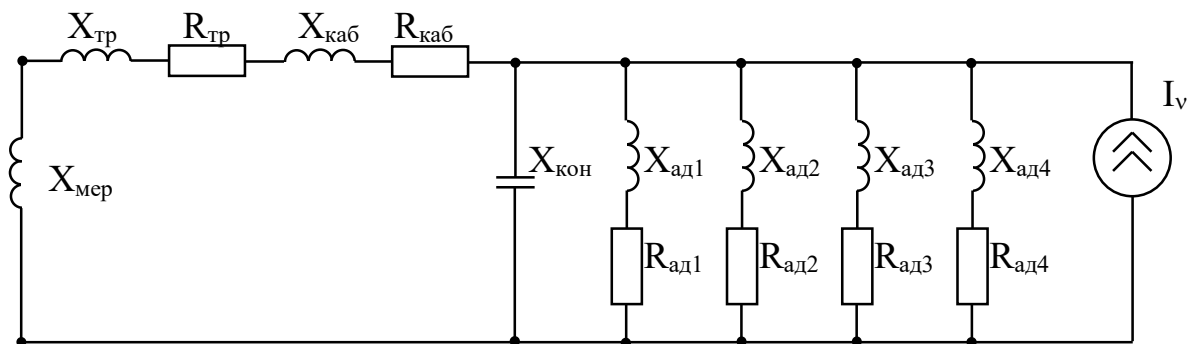
Нормально допустиме значення коефіцієнта несинусоїдальності для напруги в СЕП з номінальною напругою $U_{\text{ном}} = 0,38$ кВ становить 8,0%. Гранично-допустиме значення – $K_{\text{нс}} = 12\%$ [14].

Вплив джерела несинусоїдальності на систему електропостачання індивідуальний, оскільки визначається параметрами СЕП, до складу якої він входить. Як приклад розглядається типова система електропостачання, схема якої зображена на рис. 6.8,а. У постановку задачі входить визначення коефіцієнта несинусоїдальності на стороні нижчої напруги трансформатора під час роботи СМВ, і, як наслідок, його вплив на інші споживачі електроенергії [55].

На схемі зображено: Т – понижувальний трансформатор типу ТМ-100/10, потужністю 100 кВА, напругою 10/0,4 кВ. Дані досліду короткого замикання: $U_k = 4,5\%$, $P_k = 1970$ Вт. Дані досвіду холостого ходу: $I_{\text{хх}} = 2,6\%$, $P_k = 330$ Вт. Активний та індуктивний опори, наведені до вторинної обмотки трансформатора: $R_{\text{тр}} = 0,0053$ Ом, $X_{\text{тр}} = 0,072$ Ом, відповідно. Кабельна лінія між трансформатором і споживачами довжиною 90 метрів, кабель трижильний ААБ по 50 мм², прокладений у землі. З урахуванням прийнятої довжини і питомих показників активний та індуктивний опір кабельної лінії: $R_{\text{каб}} = 0,002$ Ом, $X_{\text{каб}} = 0,0006$ Ом, відповідно. Споживачами є чотири нерегульовані асинхронні двигуни 4АМУ160М4, 11кВт кожний, і СМВ, до складу якої входить двигун 4АМУ280М8 потужністю 45 кВт. Настільки значна відносна потужність регульованого навантаження і наявність кабельної лінії між трансформатором і навантаженням задані з метою отримання найбільшого впливу СМВ на систему електропостачання.



а



б

Рис. 6.8. Схема системи електропостачання промислових навантажень – а та її розрахункова схема заміщення – б

Еквівалентні опори АД визначаються з параметрів схеми заміщення при номінальному ковзанні за виразами

$$r_{ад} = r_1 + \frac{(x_0 v)^2 r_2' / s}{(x_2' v + x_0 v)^2 + \left(\frac{r_2'}{s}\right)^2}, \quad (6.3)$$

$$x_{ад} = x_1 v + x_0 v - \frac{(x_0 v)^2 (x_2' v + x_0 v)}{(x_2' v + x_0 v)^2 + \left(\frac{r_2'}{s}\right)^2}, \quad (6.4)$$

де v – номер гармоніки.

У СЕП з напругою 0,38 кВ виконується компенсація реактивної потужності. Для цієї мети застосовується конденсаторна установка УК1-0,415-20 ТЗ, потужністю 20 кВАр і реактивним ємнісним опором $X_{кон} = 8$ Ом. Опір зовнішньої системи ДЖ має реактивний характер і становить $X_{мер} = 0,05$ Ом.

Для виконання аналізу ділянка СЕП замінюється розрахунковою схемою, на якій кожен з елементів замінюється еквівалентними опорами (рис. 6.8,б). Електромеханічна система мінімізації втрат еквівалентується джерелом струму вищих гармонік. Розрахунок вищих гармонік напруги на ділянці СЕП проводиться за очевидним виразом [30]

$$U_v = Z_{ev} \cdot I_v, \quad (6.5)$$

де U_v – шукана напруга v -ї гармоніки, В;

Z_{ev} – повний еквівалентний опір ділянки СЕП на частоті цієї гармоніки, Ом;

I_v – струм v -ї гармоніки, зумовлений дією всіх джерел ВГ, А.

Головною особливістю розрахунків несинусоїдальних режимів у системах електропостачання з напругою до 1 кВ є необхідність урахування активних опорів елементів СЕП. Відношення еквівалентних реактивного і активного опорів на основній частоті перебуває в межах, тому неврахування активних опорів призводить до значної похибки. Опір зовнішньої СЕП можна приймати суто індуктивним. Зміну індуктивних опорів елементів СЕП можна з достатнім

ступенем достовірності врахувати добутком індуктивного опору на основній частоті та коефіцієнта, що визначає номер гармоніки.

$$X_v = X \cdot v. \quad (6.6)$$

Допускається, що зі зміною частоти активні опори статичних елементів СЕП не змінюються і дорівнюють опорам на основній частоті. Зміна еквівалентних активних опорів асинхронних двигунів визначається за виразом (6.3).

Спрощення схеми заміщення до повного еквівалентного опору Z_{ev} здійснюється за методикою, відомою в теорії кіл змінного струму. Кожна з гілок схеми замінюється двома паралельними гілками, що характеризуються активною – G_v і реактивною – B_v провідністю [55]

$$G_v = \frac{R_v}{R_v^2 + X_v^2}, \quad (6.7)$$

$$B_v = \frac{X_v}{R_v^2 + X_v^2}, \quad (6.8)$$

де R_v и X_v – активний і реактивний опір вихідної гілки на частоті v -ї гармоніки, Ом.

Для ємності реактивний опір і провідність приймають від'ємні значення.

Після заміни всіх паралельних гілок двома з активною і реактивною провідностями, шляхом алгебраїчного додавання, здійснюється зворотний перехід до еквівалентних опорів R_{ev} и X_{ev} . За відомими параметрами еквівалентних активного і реактивного опорів визначається повний еквівалентний опір схеми заміщення на частоті v -ї гармоніки

$$Z_{ev} = \sqrt{R_{ev} + X_{ev}}. \quad (6.9)$$

У табл. 6.2 наведено значення повних еквівалентних опорів ділянки СЕП для всього ряду досліджуваних гармонік.

Таблиця 6.2

Значення повних еквівалентних опорів і частот вищих гармонік

ν	5	7	11	13	17	19	23	25
$\omega_\nu, \text{с}^{-1}$	1570	2198	3454	4082	5338	5966	7222	7850
$Z_e, \text{Ом}$	0,577	0,781	1,187	1,390	1,800	2,005	2,418	2,624

Подальше дослідження здійснюється шляхом моделювання СМВ і виконання гармонійного аналізу струмів статора АД [18]. На рис.6.9 наведено криву зміни коефіцієнта несинусоїдальності на стороні НН трансформатора, що живить, для випадків роботи з різним навантаженням АД.

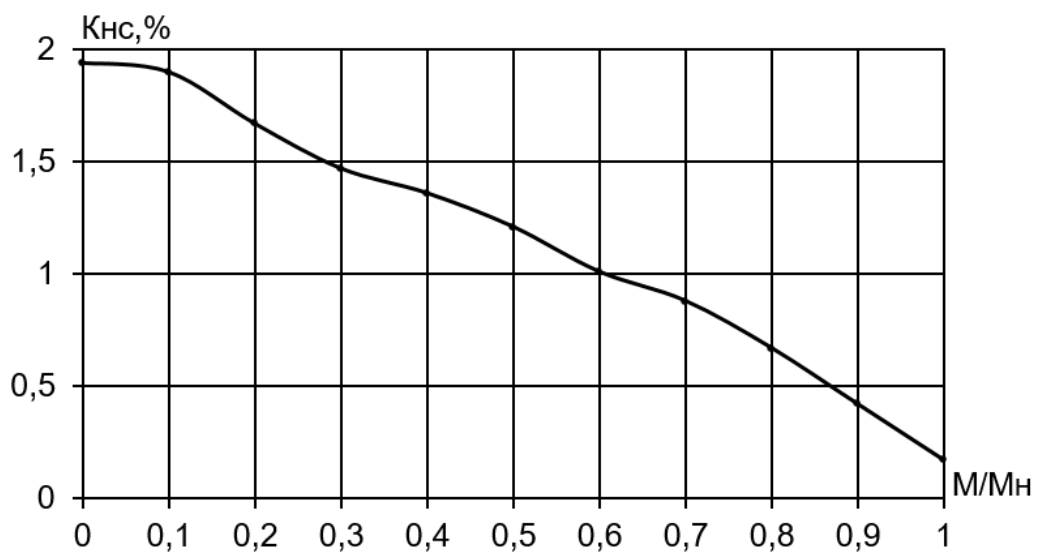


Рис. 6.9. Крива зміни коефіцієнта несинусоїдальності

Результати показують, що значення коефіцієнта несинусоїдальності збільшуються зі зменшенням моменту навантаження на валу АД, а максимальне значення не перевищує 2 %, що значно менше за нормально допустиме значення. На відміну від більшості джерел несинусоїдальності, негативний вплив СМВ на систему електропостачання обмежується природним чином. Так, у процесі роботи СМВ зі значними моментами навантаження, близькими до граничного, абсолютні значення струмів великі, проте вплив ТПН проявляється незначно [48]. При малому навантаженні, навпаки, ТПН істотно впливає на форму струмів АД, але абсолютні значення діючих струмів малі.

ВИСНОВКИ

1. Історія розвитку асинхронного електроприводу з ТПН налічує більше п'ятдесят років, однак, і сьогодні не можна говорити про те, що всі науково-технічні проблеми вирішено, а його резерви технічного вдосконалення вичерпано. Існує широка низка промислових механізмів безперервної та циклічної дії, для яких не потрібна тривала робота на швидкості нижче номінальної, а застосування електропривода ТПН-АД раціональне і перспективне.

2. Потенційна можливість живлення ТПН-АД від джерела із напругою з неномінальними показниками якості зумовлює необхідність застосування моделі АД в природних трифазних осях А,В,С у фазних, або лінійних величинах. Обов'язковим є врахування нелінійностей двигуна – насамперед, насичення магнітного кола за основним шляхом і шляхами розсіювання, ефект витіснення струму.

3. Моделювання ТПН можливо на підставі контролю стану тиристорів за допомогою логічних комутаційних функцій з подальшим переходом до трьох- або двофазних моделей АД.

4. Синтезована, за допомогою узагальненого алгоритму, модель ТПН-АД, дозволяє проводити необхідні дослідження статичних і динамічних режимів. Модель перевірена, а її адекватність реальному електроприводу підтверджена численними експериментами.

5. У Вид і характер нестійких режимів роботи ТПН-АД залежать, передусім, від параметрів електроприводу і початкових електромагнітних умов. Виникнення коливань зумовлене дією внутрішнього позитивного зворотного зв'язку ЕП.

6. Вдосконалена методика дослідження стійкості розімкнутої системи ТПН-АД поєднує аналітичні та чисельні способи аналізу. Вона універсальна і може застосовуватися для всіх типів асинхронних короткозамкнених двигунів.

7. Отримана передавальна функція електромагнітної частини асинхронного двигуна характеризує перехідну функцію при врахуванні всіх дев'яти складових електромагнітного моменту двигуна.

8. Аналіз співвідношень постійних часів перехідної функції електромагнітного моменту АД дає змогу не тільки прогнозувати можливість виникнення нестійких режимів роботи в асинхронному електроприводі з ТПН, а й розробляти попередні рекомендації щодо застосування різних типів АД в його складі.

9. У діапазоні робочих ковзань нестійким режимам найбільш схильні АД з короткозамкненим ротором середньої потужності.

10. У кожному сімействі асинхронних двигунів однієї серії існує «граничний» АД, з яким асинхронний електропривод з ТПН має максимальну зону нестійкої роботи. Тоді як, у разі використання двигунів більшої або меншої потужності, зона нестійкої роботи зменшується.

11. Запропонований інноваційний спосіб компенсації дії внутрішнього позитивного зворотного зв'язку ТПН-АД, за якого забезпечується задана вихідна напруга перетворювача, незалежно від фази струму навантаження. При цьому алгоритмі керування виникнення нестійких режимів ЕП роботи принципово неможливе.

12. Несиметрія напруги джерела живлення викликає коливальний характер моменту і швидкості АД з частотою 100 Гц, призводить до збільшення тривалості механічних перехідних процесів двигуна, обумовлює несиметрію струмів АД.

13. За несиметрії напруги джерела живлення і номінальних моментів навантаження в одній або двох фазах двигуна, значення діючих струмів статора перевищують номінальне значення. Це зменшує діапазон робочих моментів ЕП за умовою тривалої роботи з безпечним нагрівом.

14. Несиметрія струмів статора найбільш виражена за малих ковзань АД під час роботи на основній характеристиці за відсутності керування ТПН.

15. Запропонована система автоматичного симетрування струмів статора АД забезпечує:

- за коефіцієнтів несиметрії напруги джерела живлення $K_u < 15\%$ зменшення коефіцієнтів несиметрії струмів більш ніж на порядок, що практично зумовлює рівність діючих струмів статора у фазах АД;

- усунення коливань швидкості АД (за $K_u < 10\%$, $0,3M_n < M < 0,9M_n$) або їх значне зменшення;

- значне розширення діапазону тривалих робочих моментів ЕП за умовою нагріву (за $K_u = 10\%$, до симетрування $0 < M < 0,53M_n$ та після $0 < M < 0,85M_n$);

- відносно високу швидкодію (1,0 - 1,2 с. для двигунів середньої потужності), що відповідає часу закінчення процесу симетрування;

- компенсацію власної несиметрії елементів електроприводу – СІФК, ТПН, АД;

- усунення нестійких режимів роботи, властивих розімкненим системам ТПН-АД.

16. Асинхронний електропривод з ТПН дає змогу здійснювати мінімізацію втрат потужності в АД з одночасними функціями симетрування під час живлення від джерела з несиметричною напругою.

17. Запропонована система автоматичної мінімізації втрат потужності в АД характеризується реалізацією роздільного пофазного керування з застосуванням трьох каналів керування і трьох каналів зворотного зв'язку. Проблема мінімізації втрат потужності в АД вирішується за рахунок підтримання рівності кутів запізнювання закінчення струмів АД δ оптимальному значенню.

18. При живленні від джерела з несиметричною напругою мінімізація втрат потужності та симетрування струмів досягається за рахунок рівності кутів δ в кожній з фаз АД, при цьому кути включення вентилів ТПН принципово не симетричні.

19. Запропонована система мінімізації втрат, при живленні від джерела живлення з симетричною напругою, забезпечує:

– зменшення втрат потужності в АД в діапазоні робочих моментів $0 < M < M_{гр}$ на 10 - 55% відносно втрат під час роботи на основній механічній характеристиці. Економія досягається за рахунок зменшення втрат на намагнічування при зменшенні напруги на статорі АД. Зменшується споживана реактивна потужність, що призводить до збільшення коефіцієнтів потужності АД;

– найбільший ефект зменшення втрат у тих випадках, коли енергетичні показники АД, через їх конструктивні особливості, виявляються незадовільними.

20. При живленні ЕП від джерела з несиметричною напругою, система мінімізації втрат забезпечує:

– збереження функції і показників мінімізації втрат потужності в АД;

– режим симетрування ЕП, що характеризується зменшенням коефіцієнтів несиметрії струмів у 1,5 - 6 разів, а також зменшенням негативних наслідків, спричинених несиметрією напруги джерела живлення;

21. Систему мінімізації втрат потужності доцільно застосовувати при живленні ЕП від джерела з несиметрією напруги, що визначається коефіцієнтами не більш $K_u < 4 - 8 \%$. Її вплив, як джерела несинусоїдальності, на ділянку системи електропостачання найбільше проявляється в діапазоні малих моментів навантаження і малих струмів АД. Значення коефіцієнта несинусоїдальності збільшуються зі зменшенням моменту навантаження АД, але максимальне значення не перевищує 2 %, що менше за нормально допустиме значення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воскобойник В. Е., Бородай В. А., Боровик Р. О., Нестерова О. Ю. Основы электропривода виробничих машин та комплексів : навчальний посібник. Дніпро : Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2021. 254 с.
2. Регульований електропривод: підручник / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. Санченко / за ред. І. М. Голодного. Київ : ТОВ «ЦП «Компринт», 2019. 509 с.
3. Загірняк М. В., Коренькова Т. В., Калінов А. П., Гладир А. І. Сучасні перетворювачі частот в системі електропривода: навчальний посібник. Харків : Точка, 2017. 210 с.
4. Браславский И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. Москва : Энергоатомиздат, 1998. 224 с.
5. Петров Л. П., Ладензон В. А., Обуховский М. П. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами. Москва : Энергия, 1980. 128 с.
6. Електричні машини і трансформатори: підручник / за заг. ред. В. І. Мілих. Харків : ХПІ, 2017. 452 с.
7. Trzynadlowski A.M. Control of Induction Motors. Academic Press, 2011. 230 p.
8. Андрющенко О. А., Бабийчук О. Б., Вычужанин А. А. Асинхронный электропривод с тиристорным преобразователем напряжения, синхронизированным с током нагрузки. Электромашиностроение и электрооборудование. 1991. № 46. С. 29–32.
9. Андрющенко О. А., Лю Ким Тхань. Исследование выходного напряжения ТПН при различных способах синхронизации тиристорov. Электромашиностроение и электрооборудование. 1995. Вып. 47. С. 40–46.
10. Boiko A., Besarab A., Semeniuk V., Naydenko E. Sinthesis of methods stability research of the electric drive «Thyristor voltage converner – induction motor».

- Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. №3/2(81). С. 15–26.
11. Andryushchenko O., Boiko A. Maple Software Applied for Stability Research of Electric Drive TVC-IM. Simulation News Europe. 2013. № 38/39. P. 35–37.
 12. Бойко А.А. Анализ возможности экономии энергии потребляемой лифтовыми лебедками при применении тиристорных преобразователей напряжения. Підйомно-транспортна техніка. 2019. Вып. 3 (43). С. 89—93.
 13. Андриющенко О. А., Бойко А. А., Бабийчук О. Б. Особенности режимов минимизации потерь в асинхронных двигателях. Електромашинобудування та електрообладнання. 2004. № 62. С. 24–28.
 14. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях: 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 2010. 252 с.
 15. Boiko A., Budashko V., Yushkov Y., Boiko N. Synthesis and research of automatic system balancing of asynchronous motor currents with voltage converter. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. №1/2(79). С. 22–34.
 16. Boiko A., Volyanskaya Ya. Synthesis of the system for minimizing losses in asynchronous motor with a function for current symmetrization. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. №4/5 (88). С. 50–59.
 17. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
 18. Бойко А. О., Бересан А. А. Моделирование системы ТПН-АД. Математическое моделирование. 2010. С. 39–42.
 19. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник для студ. вузов. Москва : Высш. шк., 2001. 327 с.
 20. Бойко А. О., Бесараб О. М., Пліс В. П. Особливості математичного моделювання асинхронного двигуна з урахуванням його нелінійностей. Праці Одеського Політехнічного Університету. 2022. № 2 (66). С. 32–42.

21. Вища математика : базовий підручник для вузів / під ред. В. С. Пономаренка. Харків : Фоліо, 2016. 669 с.
22. Моделювання електромеханічних систем : підручник / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. Кременчук : 2011. 376 с.
23. Толочко О. И., Розкаряка П. И., Журов И. О. Моделирование асинхронного двигателя при обрыве фазы статора. Электротехнические и компьютерные системы. 2014. №15 (91). С. 262–266.
24. Торопов А. В., Лістовщик Л. К., Торопова Л. В., Терентьев О. М. Віртуальна модель системи «асинхронний двигун - пристрій плавного пуску з двома регульованими фазами». Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 3 (73). С. 119–124.
25. Krishnan R. Electric motor drives: modeling, analysis, and control. Prentice Hall, 2021. 652 p.
26. Бойко А. А. Ограничение неустойчивых режимов работы лифтовых подъемных механизмов с электроприводом ТПН-АД. Підйомно-транспортна техніка. 2019. Вып. 2 (42). С. 36–45.
27. Андриющенко О. А., Бойко А. А. Методика исследования устойчивости электропривода ТПН-АД. Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2000. Вып. 113. С. 63–64.
28. Крупин Н. С., Клепиков В. Б. Исследование динамических режимов в системе ТПН-АД электропривода эскалатора метрополитена. Університетська наук.- практ. конф. (м. Харків, 14-16 квітня 2009 р.). Харків, 2009. С. 2.
29. Андриющенко О. А., Бойко А. А. Исследование устойчивости разомкнутой системы электропривода ТПН-АД, ЭПШТ. 2007. С. 127–131.
30. Yong-xiu Wang, Zhi-qian Mei and Rui Wang. The stability analysis of the position control system with disturbance observer for induction machine drive. 2018 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge.

2018. P. 478–484.
- 31.Браславский И. Я., Зюзев А. М., Костылев А. В. Разработка, исследование; внедрение систем «тиристорный преобразователь напряжения — асинхронный двигатель». Электротехника. 2019. №9. С. 13–16.
- 32.Андрющенко О. А., Бойко А. О. Природа нестійких режимів в розімкнутій системі електроприводу «Тиристорний перетворювач–асинхронний двигун». Електроінформ. 2006. № 2. С. 6–7.
- 33.Бойко А. А. Динамические свойства асинхронных электродвигателей. Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. 2000. №2(7). С. 75–80.
- 34.Андрющенко О. А., Бойко А. А., Волянская Я. Б. Формирование выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки. Електромашинобудування та електрообладнання. 2006. № 66. С. 33–34.
- 35.Особенности формирования алгоритма управления тиристорными лифтовыми системами / А. А. Бойко, В. Ф. Семенюк, А. Н. Бесараб, Н. В. Мирошниченко, Н. В. Акчебаш. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2018. № 22 (98). С. 67–73.
- 36.Электропривод : підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко / за ред. Ю. М. Лавріненка. Київ : Ліра-К, 2009. 504 с.
- 37.Boiko A., Besarab A., Sokolov Y., Shapa L. Improvement of Energy Indicators of Asynchronous Motor under the Conditions of Asymmetric Voltage Supply. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE. 2019. № 1–1 (40). P. 25–35.
- 38.Boiko A., Naidenko E., Besarab A., Maevskaya E. Study of Starting and Disconnecting Modes of an Asynchronous Electric Drive of a Centrifugal Pump. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE. 2024. № 2 (62). P. 28–37.
- 39.Андрющенко О.А., Лю Ким Тхань. Электропривод ТПН-АД с автоматическим симметрированием токов статора. Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 1995. С. 136–137.

40. Андриященко О. А., Бойко А. А., Бабийчук О. Б. Особенности режимов минимизации потерь в асинхронных двигателях. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2004. № 62. С. 24–28.
41. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергоощадження засобами промислового електропривода : навч. посіб. Київ : Кондор, 2015. 408 с.
42. U.Sri Anjaneyulu, T. Satish Babu, Y. Sumith and Y. Narendra Kumar. The Impact of Three Phase Soft Starter Controller on Asynchronous Machine Response to Transients using MATLAB/Simulink. *International Journal of Scientific Research and Reviews*. 2019. Vol. 8(2), P. 1320–1334.
43. Adjustable electric drive / ed. Ivan Golodnyi. Kyiv : LLC "CP" Comprint", 2015. 509 p.
44. Браславский И. Я., Зюзев А. М., Костылев А. В. Разработка, исследование; внедрение систем «тиристорный преобразователь напряжения — асинхронный двигатель». *Электротехника*. 2014. №9. С. 13–16.
45. Myasovsky V. A. Comparison of voltage setting modes when starting an induction motor with a device for smooth start and direct start. *Young Scientist*. 2020. № 21 (311). P. 520–527.
46. Eschin E. K., Sokolov I. A. Operation of the asynchronous electric motor with the device of smooth start. *Electromechanics*. 2020. №5 (547). P. 53–67.
47. Бойко А. О., Бабийчук О. Б. Особенности реализации системы минимизации потерь мощности ТПН-АД при питании от источника с несимметричным напряжением. *Збірник наукових праць Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2014. С. 156.
48. Андриященко О. А., Бойко А. А. Электропривод ТПН-АД с системой оптимизации энергетики при питании двигателя от сети с несимметричным напряжением. *Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*. 2001. Вып. 114. С. 326–327.

- 49.Торопов А. В., Торопова Л. В. Дослідження динамічних характеристик системи «Пристрій плавного пуску – асинхронний двигун» в режимі роботи із зниженою швидкістю. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2021. № 4. С. 30–36.
- 50.Возняк О. М., Штуць А. А., Тихонов В. К. Дослідження пускових режимів асинхронних двигунів та розробка пристрою плавного пуску. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 3 (118). С. 133.
51. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2009. 146 с.
- 52.Андрющенко О. А., Бойко А. А. Применение микропроцессорных средств управления системой минимизации потерь мощности с функциями симметрирования. *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. 2010. № 45. С. 405–408.
- 53.Чепелюк О. О., Милашич А. В. Лабораторний стенд для дослідження режимів роботи пристрою плавного пуску трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. 31-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, (м. Харків, 17-20 травня 2023 р.)*. Харків, 2023. С. 84.
- 54.Petrushin V. S., Yakimets A. M., Plotkin Yu. R., Enoktaev R. N. Research of smooth start of the asynchronous engine. *Technical electrodynamics*. 2018. №1. P. 56–61.
- 55.Андрющенко О. А., Бойко А. О., Бабийчук О. Б. Влияние режима минимизации потерь электропривода ТПН-АД на качество напряжения участка системы электроснабжения. *Проблеми АЕП Теорія і практика*. 2007. С. 532–533.