

**Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонська філія**

Енерготехнічний факультет
Кафедра автоматики та електроустаткування

Рекомендовано до захисту
Завідувач кафедри автоматики та
електроустаткування

_____ Михаліченко П.Є.
(підпис) (прізвище, ініціали)

«___» _____ 20__ року

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Розробка векторної системи керування асинхронним електроприводом з автономним інвертором струму»

Здобувач б курсу, групи 6367зм
за спеціальністю: 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Освітньо-професійна програма:
«Експлуатація суднових автоматизованих
(назва)

систем»

Івановський М.М. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Керівник Костюченко В.І. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Білюк І.С. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

Херсонська філія

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Енерготехнічний

Кафедра, циклова комісія Автоматики та електроустаткування

Освітньо-кваліфікаційний рівень другий, (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

(шифр)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

Освітньо професійна програма «Експлуатація суднових автоматизованих систем»

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної та електроустаткування

Михаліченко П.Є.

“ ___ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Івановський Максим Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка векторної системи керування асинхронним електроприводом з автономним інвертором струму

Керівник роботи: к.т.н. Костюченко Віталій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу

від “ ___ ” _____ 20__ року № ___

2. Строк подання здобувачем роботи _____

3. Вихідні дані до роботи підвищення швидкодії та технічне спрощення автоматичного керування асинхронним електроприводом, виконаним на основі автономного інвертора струму з широтно-імпульсною модуляцією

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Конструктивні особливості існуючих силових схем асинхронного електроприводу; 2. Прогнозна система управління в асинхронних електроприводах з АІС-ШІМ; 3. Охорона праці; 4. Охорона навколишнього середовища

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

презентація в електронному виді

АНОТАЦІЯ

Об'єм пояснювальної записки становить 109 аркушів, вона містить 4 розділи, 34 рисунка, 1 таблицю, 57 найменувань в списку використаної літератури. Мультимедійна презентація представлена на 12 слайдах.

Об'єктом дослідження є електромагнітні й електромеханічні процеси, енергетичні показники АЕП з АІС-ШІМ, досягнуті при удосконаленому керуванні.

Предметом досліджень є способи автоматичного керування для АЕП з АІС-ШІМ.

Метою роботи є розробка векторної системи керування асинхронним електроприводом з автономним інвертором струму.

В роботі розроблені та науково обґрунтовані ефективні способи прогнозуючого векторного керування і створені на їх основі спрощені структури автоматичного регулювання для асинхронного електропривода з автономним інвертором струму з широтно-імпульсною модуляцією. Вони забезпечують швидкодіюче керування електромеханічними процесами та поліпшенні енергетичні показники електропривода. На імітаційній моделі досліджені електромагнітні й електромеханічні процеси електропривода при регулюванні швидкості АД або положення його ротора, а також при провалах мережної напруги і її наступному відновленні. Визначено параметри швидкодії й енергетичні показники розглянутого електропривода.

Також розглянуто положення міжнародної конвенції МАРПОЛ 73/78 по запобіганню забруднення з суден.

Ключові слова: асинхронний електропривод, автономний інвертор струму, активний випрямляч струму, прогнозуюче керування.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ІСНУЮЧИХ СИЛОВИХ СХЕМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	
1.1. Аналіз відомих силових схем асинхронного електроприводу на основі автономного інвертора струму.....	10
1.2. Загальні принципи, способи і підходи до регулювання асинхронних електроприводів з автономним інвертором струму.....	20
1.3. Аналіз способів регулювання активним випрямлячем струму.....	25
1.4. Аналіз управління асинхронними електроприводами з автономним інвертором струму при провалах мережевої напруги.....	27
1.5. Розробка математичної моделі асинхронного електроприводу з АІС-ШІМ	28
1.6. Розрахункові залежності для енергетичних показників електропривода.....	42
1.7. Імітаційні моделі асинхронного електроприводу з АІС-ШІМ.....	43
Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОГНОЗНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ В АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ З АІС-ШІМ	
2.1 Аналіз електромагнітних процесів в системі: "трифазна мережа живлення - активний випрямляч струму"	47
2.2 Прогнозне управління активним випрямлячем струму.....	54
2.3. Розробка системи автоматичного керування асинхронним електроприводом з АІС-ШІМ, оснащеним АВС	56
2.4. Електромагнітні і електромеханічні процеси в асинхронному електроприводі з АІС-ШІМ, оснащеним активним випрямлячем струму.....	58
2.5. Енергетичні показники для асинхронного електроприводу з АІС-ШІМ, оснащеного активним випрямлячем струму.....	71
2.6. Вплив зміни внутрішніх параметрів елементів силового ланцюга АЕП з АІС-ШІМ на прогнозне управління активним випрямлячем.....	76
Висновки до розділу 2	78

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Нормативно-правові документи, що регламентують дотримання вимог охорони праці	79
3.2. Небезпечні та шкідливі фактори на судні	81
3.3. Розрахунок освітлення в приміщенні судна	85
3.4. Заходи щодо зменшення впливу шкідливих факторів при роботі в машинному відділенні	86

РОЗДІЛ 4. ВИМОГИ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЮ СМІТТЯМ

4.1. Загальні положення	90
4.2. Обладнання і пристрої для збирання і обробки сміття та інсинератори	96
4.2.1. Пристрої для збирання і зберігання сміття	97
4.2.2. Пристрої для обробки і скидання сміття в море	100
4.2.3. Розміщення обладнання і пристроїв	101

ВИСНОВКИ	102
----------------	-----

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	104
--------------------------------------	-----

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АВС - активний випрямляч струму;
АД - асинхронний двигун;
АН - автономний інвертор напруги;
АІС - автономний інвертор струму;
АПВ - автоматичне повторне включення;
АЕП - асинхронний електропривод;
ЕРС - електрорушійна сила;
ЕП – електропривод;
ЛЕ - логічний елемент;
МФ мережевий фільтр;
ОКС - ортогональна координатна система;
ПРВУ - прогнозне релейно-векторне управління;
ПЧ - перетворювач частоти;
САУ - система автоматичного управління;
ШІМ - широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

В даний час розроблені й промислово випускаються асинхронні електроприводи на основі АІС з ШІМ, на відміну від широко розповсюджених АЕП, виконаних на основі автономного інвертора напруги з ШІМ, для АЕП з АІС-ШІМ немає обмежень відносно довжини кабеля, що з'єднує АД з перетворювачем частоти, і не потрібно для надійної експлуатації даного АЕП застосування спеціального (з посиленою ізоляцією) двигуна. Однак широке промислове впровадження зазначених електроприводів на практиці стримується складністю їхнього автоматичного керування й недостатністю досліджень у частині підвищення швидкодії, ефективного керування при провалах мережної напруги і поліпшення енергетичних показників. Дослідження даних питань і створення на їх основі швидкодіючих і економічних АЕП з АІС-ШІМ актуально в умовах України, на території якої присутній великий парк регульованих тиристорних електроприводів постійного струму (ТЕПС) і нерегульованих електроприводів з АД, який вимагає заміни на частотно-регульовані АЕП. Саме за рахунок впровадження АЕП з АІС-ШІМ з'являється можливість далі тривало експлуатувати АД й зменшити капітальні витрати при переході від ТЕПС до АЕП з АІС-ШІМ, оскільки частина силових елементів (керований випрямляч з його системою керування, згладжуючий дросель, фільтрокомпенсуючий пристрій) з ТЕПС продовжує використовуватися в АЕП з АІС-ШІМ.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є електромагнітні й електромеханічні процеси, енергетичні показники АЕП з АІС-ШІМ, досягнуті при удосконаленому керуванні.

Предметом досліджень є способи автоматичного керування для АЕП з АІС-ШІМ.

Цілі та задачі дослідження:

- розробка математичної й імітаційної моделей АЕП з АІС-ШІМ,
- удосконалення автоматичного керування АЕП з АІС-ШІМ;
- удосконалення керування активним випрямлячем струму;

- кількісна і якісна оцінки досягнутих за допомогою запропонованого керування електромагнітних й електромеханічних процесів асинхронного електропривода з АІС-ШІМ та його енергетичних показників.

Методи дослідження. Для математичного опису електромагнітних процесів в АЕП з АІС-ШІМ та при його керуванні було використано метод узагальнених векторів й операторний метод; при розробці удосконаленого автоматичного керування АЕП з АІС-ШІМ було використано методи прогнозуючого, релейного, підпорядкованого й полеорієнтованого керування, а також регулювання в обертовій координатній системі; для кількісної і якісної оцінки регулювання ЕП та його енергетичних показників було використано метод імітаційного моделювання; для оцінки достовірності розробленої імітаційної моделі й отриманих результатів було використано метод експериментального дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше одержані для АЕП з АІС-ШІМ аналітичні залежності, які в явному алгебраїчному вигляді описують поточні значення узагальненого вектора струму статора двигуна.

- вперше отримані аналітичні співвідношення, за якими уточнено розраховуються поточні значення узагальнених векторів напруги статора двигуна при живленні від АІС-ШІМ та струму мережі асинхронного електропривода.

- розроблені структури автоматичного регулювання для АЕП з АІС-ШІМ, які ґрунтуються на запропонованих прогнозуючих векторних струмовому й напруговому керуванні інвертором;

- розроблений для АЕП з АІС-ШІМ спосіб керування при провалах мережної напруги, що забезпечує примусове відкриття двох силових ключів в одній із фаз керованого (або активного) випрямляча і дозволяє запобігти виходам з ладу силових елементів перетворювача частоти в цих режимах і здійснити наступний швидкодіючий вихід електропривода на встановлений режим роботи після відновлення мережної напруги.

РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ІСНУЮЧИХ СИЛОВИХ СХЕМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

1.1. Аналіз відомих силових схем асинхронного електроприводу на основі автономного інвертора струму

Перетворювач частоти, створений на основі автономного інвертора струму, є історично першим типом перетворювача частоти з автономним інвертором. Однією з найбільш масових практичних областей його застосування є регульований електропривод змінного струму і, зокрема, - асинхронний ЕП [7].

Узагальнена функціональна схема ПЧ на основі АІС показана на рис. 1.1. Розглянутий тип ПЧ характеризується дворазовим перетворенням енергії: спочатку трифазна змінна напруга (частотою 50 Гц) мережі перетворюється за допомогою керованого випрямляча в постійний струм необхідної амплітуди, який сгладжується за допомогою дроселя і потім перетворюється за допомогою АІС в змінний струм заданої частоти.

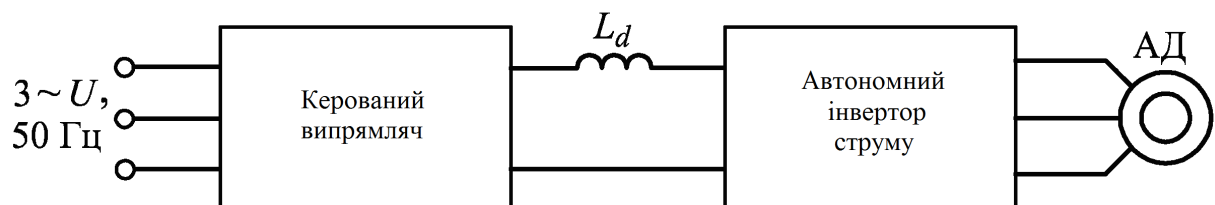


Рисунок 1.1. - Узагальнена функціональна схема асинхронного ЕП на основі АІС

Характерною особливістю ПЧ на основі АІС є те, що вхідному ланцюгу АІС притаманні властивості джерела постійного струму (що досягається включенням на виході керованого випрямляча згладжуючого дроселя L_d з великою індуктивністю). Електромагнітна сумісність інвертора з асинхронним двигуном, що представляє собою активно-індуктивне навантаження, досягається підключенням до трифазного виходу інвертора конденсаторного фільтра. При цьому АІС формує в ланцюзі навантаження струми, амплітуда і форма яких

практично не залежить від параметрів навантаження (залежними від значень і форми струмів виявляються величина і форма вихідної напруги АІС) [1, 5].

Існуючі силові схеми частотно-регульованих АЕП на основі АІС можна розділити на схеми, виконані на одноопераційних SCR-тиристорах (забезпечені силовими елементами для їх примусової комутації), і повністю керованих силових ключах: двоопераційних GTO або SGCT тиристорах або IGBT транзисторах. Обидві згадані групи схем засновані на топології паралельного інвертора струму. Розглянемо відомі силові схеми АЕП на основі АІС, в яких інвертор виконаний на одноопераційних тиристорах.

На рис. 1.2 показана електрична схема АЕП з паралельним АІС, яка включає: трифазний мостовий керований випрямляч КВ, виконаний на одноопераційних тиристорах V1 - V6; згладжуючий дросель; АІС, виконаний на одноопераційних тиристорах V7 - V12; конденсатори C1 - C3; вузол загальної комутації - комутатор К; асинхронний двигун АД.

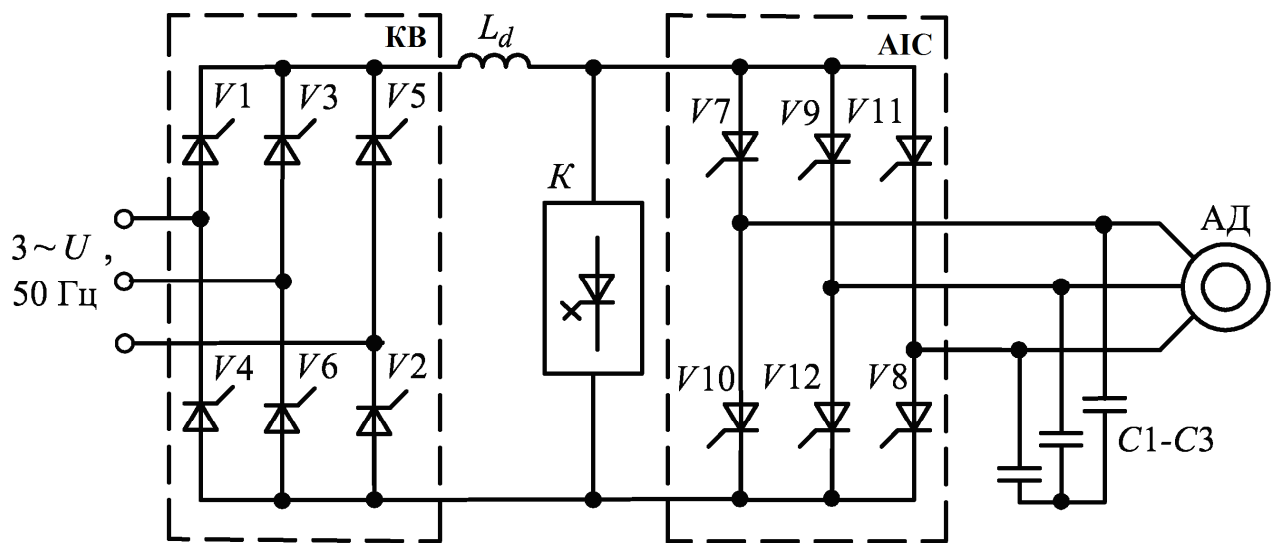


Рисунок. 1.2. - Електрична схема АЕП на основі АІС із загальним вузлом комутації

Дана схема реалізована за патентом американської фірми Ross Hill. В різних модифікаціях перетворювачі частоти з такою топологією силової схеми випускалися також компаніями Ansaldo, Silcovert H і Hill Gracham (Італія), Imvar (Англія). Особливість даної схеми ПЧ полягає в забезпеченні режиму

переривання вхідного струму інвертора комутатором К (який закорочує ланку постійного струму) при вихідних частотах АІС нижче (20-25) Гц.

Для зменшення коливань електромагнітного моменту при низьких частотах роботи АЕП вихідний струм інвертора за допомогою комутатора можна модулювати. Інвертовані струм і напруга АЕП з АІС із загальним вузлом комутації характеризуються невисоким вмістом гармонік для номінального режиму роботи АЕП: - менше 9% для статорної струму і менше 6% для статорної напруги АД [4].

Істотним недоліком силової електричної схеми на рис. 1.2 являється необхідність установки в ній комутуючих конденсаторів С1 - С3 великої ємності, на які в даній схемі покладені дві функції: компенсація реактивної потужності двигуна і забезпечення мінімального часу для замикання одноопераційних тиристорів інвертора.

На рис. 1.3 показана електрична схема АЕП на основі АІС з вузлом примусової комутації (ВПК), який виконаний на тиристорах V13 - V14, діодах D1 - D6, конденсаторах С1 - С3 і забезпечує надійну комутацію одноопераційних тиристорів V7 - V12 інвертора.

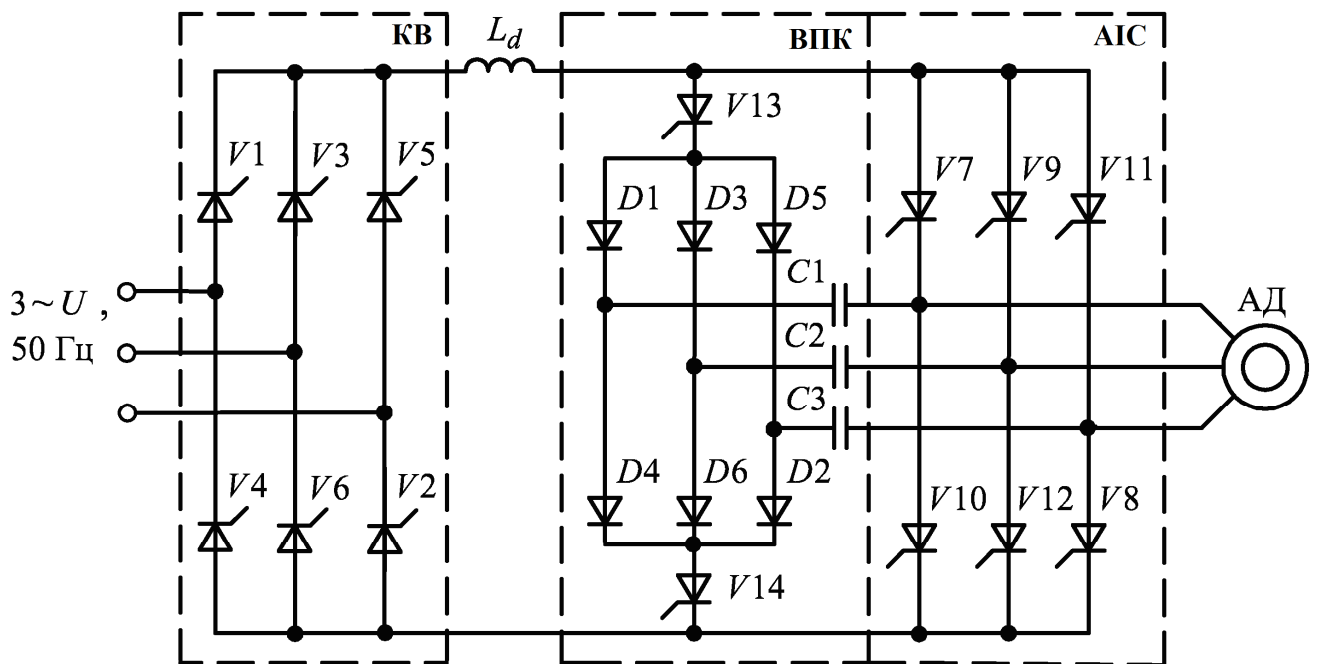


Рисунок. 1.3. - Електрична схема АЕП на основі АІС з тиристорно-діодним вузлом примусової комутації

Схема ПЧ на рис. 1.3 розроблена в середині 80-х років минулого століття і на її основі до теперішнього часу випускається фірмою ESTEL (Естонія) високовольтні ЕП серії ЕТВА потужністю (630-5000кВт). Слід зазначити, що перевагою даної схеми (у порівнянні з розглянутою на рис.1.2) є зменшене значення ємності конденсаторів, оскільки при такій побудові схеми не потрібно компенсація індуктивного характеру навантаження. Основними недоліками АЕП, наведеного на рис.1.3, є - комутаційні сплески в вихідній напрузі інвертора і щодо великий вміст гармонік в інвертованих струмах і напругах [8].

Найбільш поширеною електричною схемою для частотного регулювання асинхронних двигунів є схема АІС з відсікаючими діодами, показана на рис 1.4. Відсікаючі діоди D1 - D6 в даній схемі призначені для зменшення встановленої ємності комутуючих конденсаторів C1 - C6 і підвищення стійкості комутації на низьких частотах силових тиристорів інвертора.

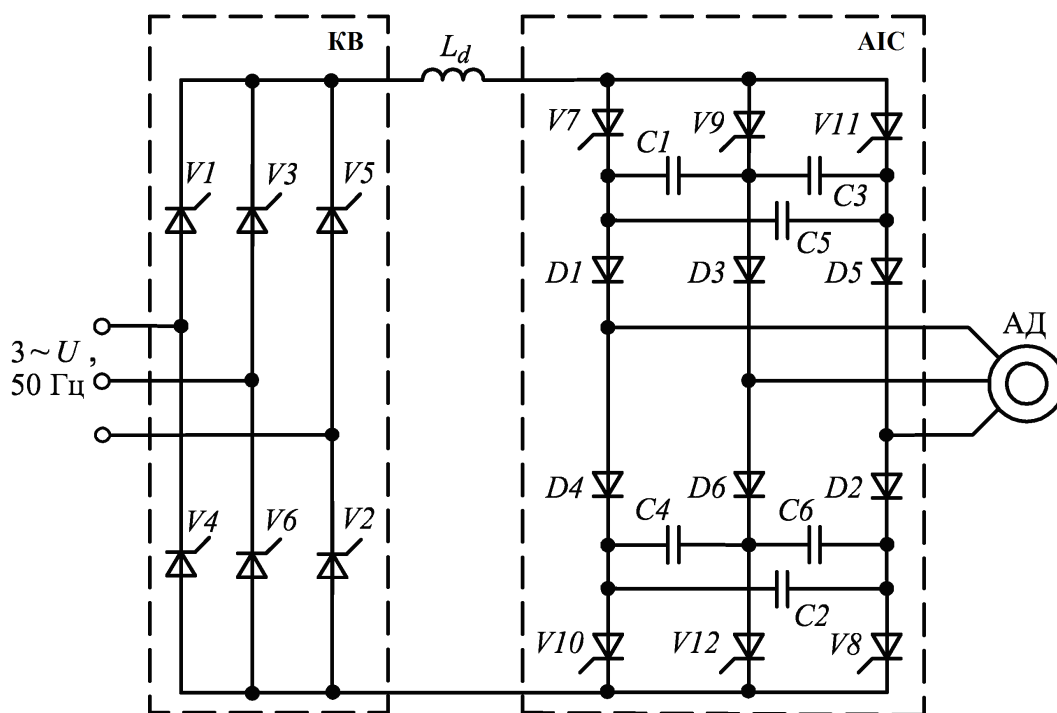


Рисунок 1.4. - Електрична схема АЕП на основі АІС з відсікаючими діодами

Електрична схема АЕП на основі АІС з відсікаючими діодами у порівнянні зі схемою, показаній на рис.1.3, має більш просту систему управління (за рахунок зменшення загальної кількості використовуваних тиристорів) і краще використання основних тиристорів. Крім того, дана схема ЕП має вагомні переваги

перед усіма існуючими схемами (в тому числі і на повністю керованих силових ключах), що полягає у виключенні в таких ЕП резонансних процесів за рахунок відділення конденсаторів $C1 - C6$ від АД діодами $D1 - D6$. Крім того, розглянута схема АЕП забезпечує стійку роботу АД в широкому діапазоні зміни вихідних частот інвертора (1:20 - 1:50) при незмінній ємності комутуючих конденсаторів.

В силу зазначених переваг АЕП на основі АІС з відсікаючими діодами отримав найбільш широке поширення серед схем з АІС для частотно-регульованого АЕП. В даний час АЕП пропромислово випускають фірми: Елетекс, Україна (ПЧІТ); ЕОС, Україна (ПЧТЕ-Т222); Технорос, Росія (ПЧІТ-К).

Основними недоліками схем АЕП з АІС на одноопераційних тиристорах є: - суттєва несинусоїдальна форма статорного струму двигуна (особливо на низьких швидкостях) і нерівномірність його обертання при малих швидкостях, що обмежує діапазон регулювання швидкості ЕП; - невисока швидкодія при відпрацюванні впливів і реакції на збурення [37].

Стрімкий розвиток силової напівпровідникової перетворювальної техніки і поява повністю керованих силових ключів дало можливість спростити силову схему АІС (за рахунок виключення вузлів примусової комутації) і підвищити ефективність його управління за рахунок застосування методу ШІМ [18].

На рис. 1.5 представлена електрична схема АЕП на основі АІС з ШІМ (АІС-ШІМ), що набула поширення в кінці 80-х років минулого століття.

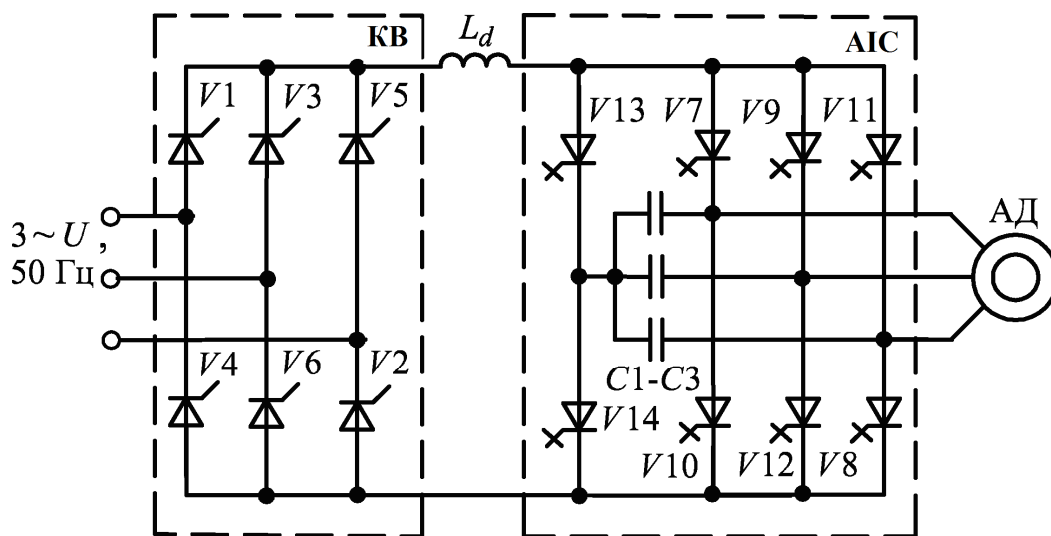


Рисунок 1.5. - Електрична схема АЕП с АІС-ШІМ

В даній схемі АІС виконаний на двохопераційних (замикаючихся) тиристорах V7 - V12. Використання в даній схемі двох силових ключів V13 і V14, які загальною точкою з'єднані із загальною точкою конденсаторів C1 - C3, дозволяє ефективно боротися з виникаючими резонансними явищами (в ланцюзі між конденсаторами вихідного фільтра АІС і індуктивностями статора двигуна) і формувати практично синусоїдальні за формою статорні струми і напруги двигуна.

З розвитком мікропроцесорної техніки (на базі якої створюються сучасні системи автоматичного управління для частотно-регульованих АЕП) з'явилася можливість створення і реалізації на її основі якісно нових способів управління АІС, виконаним на повністю керованих силових ключах, з застосуванням ШІМ. Це, в свою чергу, дозволило для АЕП зробити базовою схему з паралельним інвертором струму (що отримала в подальшому найбільше поширення). Силова електрична схема частотно-регульованого АЕП з паралельною схемою АІС-ШІМ показана на рис. 1.6.

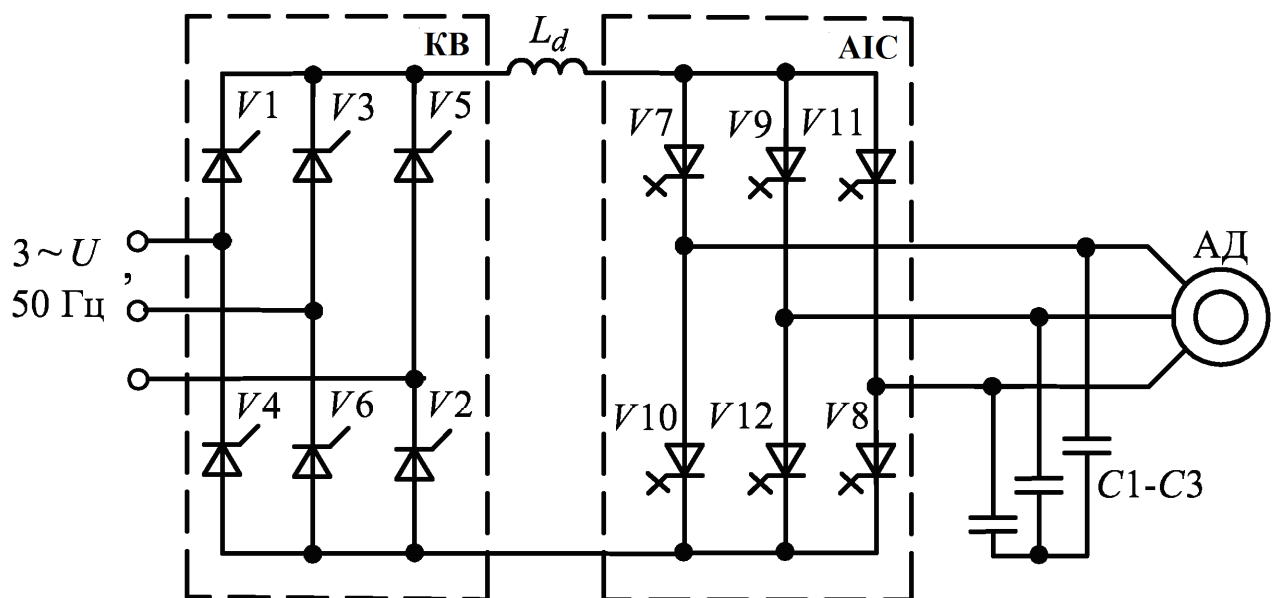


Рисунок 1.6. - Асинхронний ЕП з паралельною схемою АІС-ШІМ

Слід відзначити, що в якості повністю керованих силових ключів V7 - V12, на яких реалізовано автономний інвертор, можуть бути використані IGBT транзистори з послідовним з'єднанням діодів (забезпечують односторонню

провідність струму), а також двухопераційні GTO (або IGCT) тиристори. Крім того, в порівнянні з усіма відомими схемами АЕП, створеними на основі АІС, електрична схема АЕП з АІС-ШІМ, показана на рис 1.6, має істотні переваги:

- містить найменшу кількість силових елементів (тобто – має найбільш просту силову частину);

- використовує конденсатори зменшеною ємності (в порівнянні з конденсаторами, що встановлюються в схемах АІС з природною комутацією тиристорів), призначені тільки для забезпечення електромагнітної сумісності ПЧ і двигуна, а також для виключення перенапруг на силових ключах АІС;

- містить згладжуючий дросель зменшеною індуктивності (у порівнянні з усіма схемами АІС виконаними на одноопераційних тиристорах), так як використана більш висока частота перемикання силових ключів інвертора дозволяє формувати практично синусоїдальні за формою статорні струми АД при більш високих пульсаціях випрямленого струму.

Слід відзначити, що АЕП на основі АІС, в якому застосовується схема керованого випрямляча на одноопераційних тиристорах з фазовим способом управління, генерує в мережу живлення збільшені значення реактивної потужності . При цьому споживані мережеві струми містять велику кількість вищих гармонік і мають значення загального коефіцієнта гармонік мережевого струму більше 25%. Крім того даний АЕП має низький коефіцієнт потужності, який залежить від навантаження (тобто - від значень споживаного струму і проти-ЕРС двигуна), варіюється в широких межах і при роботі АД на холодному ходу досягає близьких до нуля значень. Найбільш поширеним способом зменшення значень реактивної потужності, що генеруються в мережу живлення частотно-регульованим АЕП з АІС-ШІМ, є застосування багатофазних схем випрямлення (зазвичай 12-ти або 18-ти пульсної), для яких необхідно багатообмоточне виконання силового трансформатора та додаткові комплекти трифазних випрямних мостів. Однак даний спосіб має високі вартісні витрати і масогабаритні показники [7].

В даний час найбільш ефективним шляхом виключення для АЕП на основі АІС-ШІМ генерованих їм в мережу живлення реактивної потужності є застосування активних випрямлячів струму (АВС).

На рис. 1.7 представлена схема АЕП з АІС-ШІМ, запропонована японськими вченими, що містить в своєму складі АВС, виконаний на восьми повністю керованих силових ключах V1 - V8. Дана схема не отримала широкого поширення внаслідок її відносної складності, пов'язаної з використанням додаткових силових ключів: V7, V8 - в АВС і V15, V16 - в АІС.

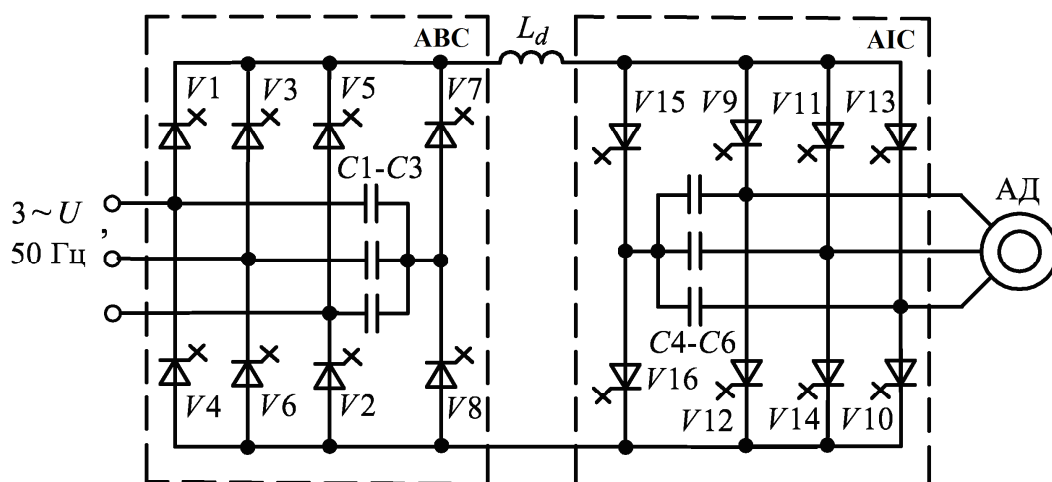


Рисунок. 1.7. - Електрична схема АЕП з АІС-ШІМ та АВС

На рис.1.8 представлена електрична схема АЕП з АІС-ШІМ, до складу якої входить АВС (виконаний на шести повністю керованих силових ключах V1 - V6). Вже згадана схема випрямляча найбільш краща (через простоту і зменшену кількість елементів і зниження генерації в мережу живлення реактивної потужності) при створенні частотно-регульованих АЕП на основі АІС-ШІМ [38].

В даний час на практиці найбільшого поширення при створенні промислових АЕП на основі АІС-ШІМ отримали електричні схеми, що наведені на рис. 1.6 і рис.1.8. Зокрема, високовольтний АЕП на основі АІС-ШІМ в схемних виконаннях, показаних на рис. 1.6 і рис.1.8, успішно промислово випускається канадською фірмою Rockwell Automation (PowerFlex7000) на напруги (2400-6900) В. Крім того, фірмою Transresch (Німеччина) виготовляються під замовлення низьковольтні АЕП з АІС-ШІМ, виконані згідно зі схемою на рис. 1.6.

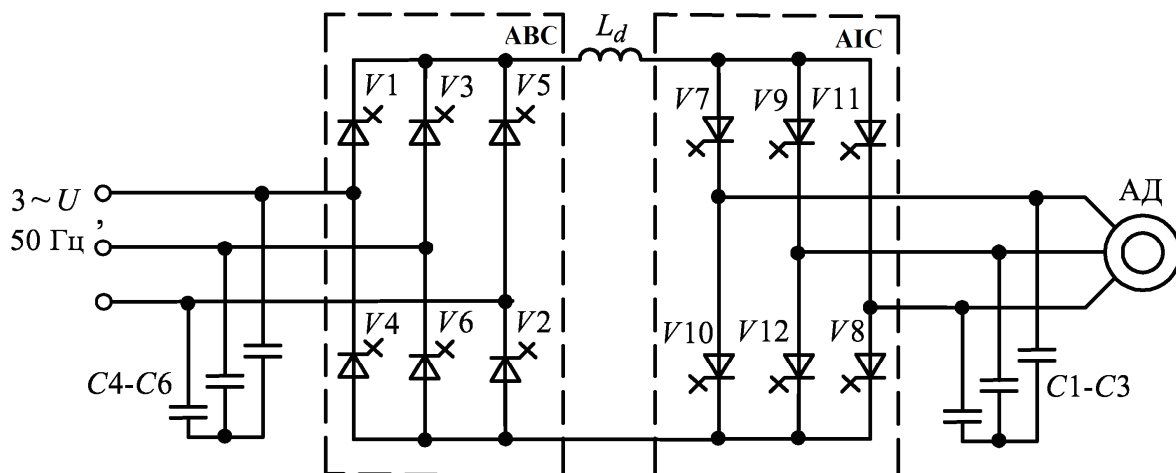


Рисунок 1.8. - Електрична схема АЕП з паралельною схемою АІС-ШІМ та АВС

Слід зазначити, що спочатку практика створення і промислового впровадження АЕП показала, що в тому випадку, коли необхідний режим генераторного гальмування з рекуперацією енергії в мережу живлення, доцільніше використовувати АЕП на основі АІС. Однак ситуація в даний час свідчить про те, що тільки високовольтні частотно-регульовані АЕП з АІС успішно конкурують з техніко-економічними показниками з іншими відомими типами АЕП. У низьковольтному ж діапазоні АЕП найбільше поширення отримали ЕП, створені на основі автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією (АІН-ШІМ) (яким, як показала практика, притаманний ряд недоліків). Найбільш істотними з зазначених недоліків є: прискорене старіння ізоляції асинхронного двигуна (пов'язане з крутими фронтами вихідної напруги АІН-ШІМ); обмеження довжини кабельної лінії, що з'єднує перетворювач і двигун; необхідність виготовлення для живлення від АІН-ШІМ спеціальних двигунів (з посиленою ізоляцією і електрично ізольованого від вала підшипниками), що ускладнює проведення реконструкції існуючих електроприводів (так як вимагає заміни АД).

У свою чергу, АЕП з АІС-ШІМ (в якому відсутні вище перераховані недоліки) має низку наступних важливих переваг: по-перше, близькими за формою до синусоїдальних статорні напруги двигуна (для яких відсутні, на

відміну від живлення двигуна від автономного інвертора напруги з ШІМ, підвищені значення похідних цих напруг, що уповільнює старіння ізоляції обмоток двигуна і продовжує загальний термін його служби в частотно-регульованих електроприводах). По-друге, відсутній електrolітичний конденсатор в ланці постійного струму перетворювача (що підвищує надійність роботи перетворювача частоти і полегшує процес аварійних режимів в інверторі). По-третє, простота технічної реалізації рекуперації енергії в живильну мережу в разі режимі гальмування приводу. По-четверте, перехід від тиристорного електроприводу постійного струму до частотно-регульованого АЕП з АІС-ШІМ забезпечується (у порівнянні з переходом до АЕП з АІН-ШІМ) зі зменшеними капітальними витратами (оскільки ряд елементів силової схеми тиристорного ЕП постійного струму, як і раніше, зберігається і не вимагає своєї заміни, зокрема: керований випрямляч з системою імпульсно-фазового управління, реактори, вхідні автоматичний вимикач і фільтрокомпенсуючий пристрій).

Важливо відзначити пов'язані з топологією силової схеми наступні особливості АЕП з АІС-ШІМ:

- регулювання середнього значення напруги на виході керованого випрямляча (або АВС) можливо тільки вниз від значення, що забезпечується трьохфазним діодним мостовим випрямлячем;

- внаслідок використання в силових схемах випрямляча і інвертора ключів з односторонньою провідністю струму вони не допускають зміни напрямлення випрямленого струму, проте допускають зміну полярностей;

- наявність в ланці постійного струму ПЧ на основі АІС згладжучого дроселя дозволяє закорочувати ланку постійного струму (силовими ключами АІС) і полегшує роботу захисту від коротких замикань в інверторі.

До основних недоліків існуючого АЕП з АІС-ШІМ відносяться:

- невисока динаміка АЕП, обумовлена наявністю в ланці постійного струму згладжучого дроселя великої індуктивності;

- схильність до автоколивань, що виникають через резонансні процеси в ланці між конденсаторами (встановлюються на виході АІС) і індуктивностями двигуна.

Виходячи з проведеного вище аналізу визначимо найкращі схеми для створення загальнопромислового АЕП на основі АІС-ШІМ, показані на рис 1.6 і рис.1.8, стосовно яких в подальшому в магістерській роботі буде вдосконалено автоматичне управління.

1.2. Загальні принципи, способи і підходи до регулювання асинхронних електроприводів з автономним інвертором струму

Для здійснення автоматичного регулювання АЕП з АІС-ШІМ використовуються принципи амплітудного і векторного управління. При цьому амплітудний принцип управління характеризується впливом системи автоматичного управління (САУ) електроприводом тільки на частоту і амплітудні значення струму на виході інвертора струму. Причому на керований випрямляч покладається завдання регулювання значення випрямленого струму (а, отже, і амплітуди статорного струму двигуна), а на інвертор (кожен силовий ключ якого знаходиться в провідному стані протягом однієї третини періода вихідної частоти струму інвертора) - регулювання його частоти. Істотними вадами даного управління є: низькі динамічні властивості АЕП (обумовлені зниженням швидкодії відпрацювання моменту і швидкості двигуна) і ненормований характер протікання електромеханічних процесів, які супроводжуються збільшеним перерегулюванням і підвищеним коливанням, приводячи найчастіше до втрати стійкості. В даний час знаходять більш широке застосування САУ з векторним принципом управління, який дозволяє отримати нормований характер електромеханічних процесів АЕП. Векторний принцип управління полягає у впливі САУ електроприводом не тільки на частоту і амплітудні значення струму (напруги) на виході інвертора, але також і на їх фазові кути. Даний принцип управління забезпечує (в порівнянні з амплітудним керуванням) кращі динамічні

властивості, можливість формувати бажану якість електромеханічних процесів, а також гарантовану сталу роботу в широкому діапазоні регулювання швидкості і моменту навантаження двигуна [5, 18].

Виходячи з вище викладеного та беручи до уваги кращі схеми АЕП з АІС-ШІМ, в подальшому виконаємо аналіз існуючих систем векторного керування для АЕП з АІС-ШІМ. Зазначені векторні САУ розрізняються між собою використовуваними в них способами управління:

- з явно вираженими модуляторами;
- з вибіркоvim виключенням гармонік;
- з векторною ШІМ;
- з прогнозуючим релейно-векторним керуванням.

Задачі управління АІС є: швидке і з необхідною точністю відпрацювання заданого значення узагальненого вектора статорного струму (або напруги) двигуна.

При ШІМ-управлінні з явно вираженими модуляторами відпираючи імпульси силовими ключами АІС виробляються в результаті порівняння двох сиглів: один з яких є опорним (і має, як правило, пилкоподібну форму), а інший - є керуючим і має трапецеїдальну або синусоїдальну форму. Залежно від форми останнього сигналу розрізняють відповідно трапецеїдальну і синусоїдальну ШІМ (в зарубіжній термінології відомі відповідно як TPWM і SPWM).

Перевагою ШІМ-управління з явно вираженими модуляторами являється фіксована частота комутації силових ключів АІС, однозначно визначена частотою опорного сигналу. До недоліків же даного управління відносяться: невисока швидкодія при регулюванні статорного струму (напруги), а також складність придушення резонансних явищ, що виникають в ланцюгах між ємностями (встановленими на виході АІС) і двигуном.

Для придушення конкретних гармонійних складових струму використовується метод вибіркового виключення гармонік (в зарубіжній літературі відомий під аббревіатурою SHE). Для реалізації даного методу вихідний струм інвертора розкладають в ряд Фур'є і виконують розрахунок відповідних

комутаційних кутів, згідно яких визначаються на періоді модуляції комбінації відкритих і закритих станів силових ключів інвертора, а також черговість їх включення і тривалість перебування у включеному стані. Метод вибіркового виключення гармонік використовують, як правило, разом з трапецеїдальною (або синусоїдальною) ШІМ для виключення резонансних процесів в ЕП та обмеження активних втрат потужності і шумів в АД. При цьому метод вибіркового виключення гармонік використовується в діапазоні верхніх частот (вище 30 Гц), оскільки при зниженні вихідної частоти АІС число рівнянь, які необхідно вирішити для знаходження комутаційних кутів, значно зростає. Тому в діапазоні нижніх частот (менше 30 Гц) застосовується трапецеїдальна (або синусоїдальна) ШІМ.

Слід зазначити, що використання ШІМ-управління з вибірковою виключенням гармонік є найбільш поширеним управлінням в високовольтних АЕП з АІС-ШІМ, для яких існує обмеження максимальної частоти комутації силових ключів інвертора (що становить значення близько 1000 Гц). Перевагою даного ШІМ-управління є можливість підтримки постійної частоти комутації силових ключів АІС, ефективність виключення небажаних гармонік зі струму обмотки статора двигуна. Недоліком цього управління є: невисока швидкодія і неможливість роботи АЕП в області низьких вихідних частот АІС [8].

Спосіб векторної ШІМ заснований на використанні відомого просторового розташування узагальненого вектора вихідного струму АІС при різних можливих (допустимих) дев'яти комбінаціях (для трифазної мостової схеми інвертора) його відкритих і закритих силових ключів. При цьому розрізняють дві групи зазначених комбінацій: три нульових і шість ненульових, при виборі яких на виході АІС формуються відповідно три нульових і шість відмінних від нуля узагальнених векторів вихідного струму інвертора. Залежно від допустимих комбінацій силових ключів АІС розрізняють векторну ШІМ з використанням і без використання нульових комбінацій силових ключів інвертора. При цьому ШІМ-управління інвертором із застосуванням нульових комбінацій є більш привабливим, тому що дозволяє отримати кращу якість регулювання параметрів

режиму АД при рівній (а в деяких режимах роботи АД і більш низькою) частоті комутації силових ключів АІС.

До переваг даного управління відносяться: технічна простота його реалізації в мікропроцесорних системах управління, висока швидкодія (що дозволяє збільшити динаміку ЕП як при регулюванні параметрів режиму АД, так і при усуненні резонансних процесів), а також можливість підтримувати постійною частоту комутації ключів інвертора.

Суть прогнозного релейно-векторного управління (ПРВУ) заключається в прогнозуванні результатів управління на певному малому часовому інтервалі (інтервалі управління). За цими результатами прогнозу здійснюється вибір такої комбінації відкритих і закритих силових ключів АІС, яка найкращим чином задовольняє завданню управління (швидкодія відпрацювання задаючих впливів, статичної точності). Застосування релейних алгоритмів при прогнозуєчому управлінні дозволяє отримати гранично досяжні динамічні характеристики АЕП і максимально використовувати наявний в системі ресурс управління, а крім того дозволяє спростити структуру системи регулювання [7].

При релейному управлінні безперервно контролюються і порівнюються з встановленими (допустимими) граничними уставками відхилення між заданими і фактичними значеннями регульованих параметрів. Якщо значення зазначених параметрів знаходяться в межах зазначених уставок, то зберігається колишня комбінація відкритих і закритих силових ключів, а якщо поза згаданих меж, - то визначається нова комбінація відкритих і закритих силових ключів, що дозволяє швидко повернути відхилення регульованих параметрів в задані межі.

Слід відзначити, що при побудові САУ сучасними АЕП з АІС-ШІМ широко використовуються і на практиці добре себе зарекомендували два способи регулювання:

- орієнтоване по полю асинхронного двигуна регулювання його електромагнітних параметрів режиму;
- підлегле регулювання параметрів режиму АД.

Орієнтоване по полю асинхронної машини регулювання полягає в забезпеченні роздільного (незалежного) управління магнітним потоком АД і його електромагнітним моментом за допомогою впливу на дві складові узагальненого вектора статорного струму двигуна: намагнічуючу (потокоутворюючу) і активну (моментоутворюючу) відповідно. Дане регулювання підвищує динаміку АЕП, нормує його електромеханічні процеси, розширює діапазон регулювання швидкості АД і підвищує точність регулювання параметрів режиму двигуна. При цьому найбільшого поширення набуло регулювання АД при орієнтації за узагальненим вектором потокозчеплення ротора, що характеризується найбільшою простотою математичного опису двигуна (як об'єкта автоматичного управління) і технічної реалізації векторної САУ.

Спосіб підлеглого регулювання характеризується наступними особливостями:

- послідовним з'єднанням автоматичних регуляторів САУ;
- кількість регуляторів САУ дорівнює кількості контурів регулювання;
- для внутрішнього контуру регулювання задаючим сигналом є сигнал зовнішнього автоматичного регулятора;
- обмеження регульованих координат електроприводу здійснюються за допомогою обмеження вихідних сигналів зовнішніх автоматичних регуляторів.

При створенні відомих частотно-регульованих АЕП використовуються (в залежності від наявності і типів застосовуваних датчиків в електроприводі) такі основні підходи до створення автоматичного управління:

- з датчиками (магнітного потоку або ЕРС), вбудованими всередині двигуна;
- з датчиками (швидкості або положення ротора), встановленими на валу двигуна;
- без датчиків, встановлених на валу або всередині двигуна.

При цьому перший підхід на практиці в автоматизованому електроприводі не знайшов свого застосування (так як вимагає переробки існуючої спеціальної електричної машини, що призводить до підвищення її вартості і зниження експлуатаційної надійності). Установка датчика швидкості чи положення ротора в

АЕП здійснюється зазвичай лише тоді, коли потрібна висока точність регулювання швидкості (з помилкою менш 1% від номінального її значення) або глибокий діапазон регулювання швидкості двигуна). Основних частина випускаються АЕП, що не вимагають точного регулювання швидкості або її глибокого регулювання, створюються без датчиків усередині і на валу двигуна. У таких електроприводах регульовані параметри двигуна (швидкість, потозчеплення) визначають за допомогою пристроїв ідентифікації.

1.3. Аналіз способів регулювання активним випрямлячем струму

В даний час в зарубіжній науково-технічній літературі приділяється підвищена увага питанням управління АВС, що входять до складу АЕП з АІС-ШІМ. Це обумовлено важливим призначенням АВС: забезпечення їм поліпшених регульовальних властивостей АЕП з АІС і зниженням генерованої потужності в мережу живлення.

Використовуються наступні способи управління АВС:

- ШІМ з явно вираженими модуляторами;
- вибіркоче виключення гармонік;
- векторна ШІМ;
- прогнозне релейно-векторне управління.

Завданням ШІМ-управління АВС є: по-перше, швидке і точне відпрацювання заданого значення випрямленого струму на виході АВС; по-друге, - формування на трифазному вході АВС імпульсних фазних струмів зі спектром, сприятливим для подальшого виділення з них основної гармоніки і придушення вищих гармонік за допомогою фільтра низьких частот.

Суть функціонування перерахованих способів ШІМ-управління АВС повністю ідентична розглянутим раніше в п. 1.2 (з тією лише відмінністю, що замість струмів на виході АІС регулюються вхідні та вихідні струми АВС). На основі аналізу цих способів управління визначимо з них найбільш доцільний для управління АВС, що входить до складу АЕП з АІС-ШІМ [7].

При ШІМ-управлінні АВС з явно вираженими модуляторами найбільшого поширення набули трапецеїдальна і синусоїдальна ШІМ. Даному ШІМ-управлінню АВС притаманний суттєвий недолік, який заключається в малому діапазоні регулювання вихідної напруги випрямляча. З метою розширення діапазону регулювання АВС в його канал завдання разом з періодичним високочастотним модулюючим впливом вводиться предмодулюючий низькочастотний вплив (наприклад, у вигляді сигналу третьої гармоніки). Однак навіть в цьому випадку величина середньої випрямленої ЕРС менше (приблизно на 9% ЕРС) некерованого трифазного мостового випрямляча. Тому для нормального функціонування АВС в складі АЕП з АІС-ШІМ повинен бути забезпечений необхідний запас по випрямленій напрузі з урахуванням граничних можливостей силової схеми АВС при способі ШІМ-управління з явно вираженими модуляторами.

Крім того, як синусоїдальній, так і векторній ШІМ властива підвищена технічна складність реалізації (пов'язана з істотним ускладненням системи регулювання за рахунок введення демпфуючих зв'язків за похідними мережевих струмів для усунення коливань, викликаних високою добротністю мережевого фільтра). Зазначені коливання при реалізації векторної ШІМ можна ефективно усунути без додаткового ускладнення САУ за рахунок послідовного включення з конденсаторами вхідного фільтра низьких резисторів. Однак такий підхід до виключення автоколивань призводить до погіршення енергетичних показників АЕП і, зокрема, зменшення його ККД.

Використання ПРВУ для АВС дозволяє істотно спростити структуру його системи управління. При цьому дане управління має високою швидкістю, характеризується простотою мікропроцесорної реалізації і забезпечує енергетичні показники, які не поступаються показникам векторних САУ з ШІМ. Слід зазначити, що відомому ПРВУ для АВС притаманні такі недоліки: збільшена кількість використовуваних датчиків (мережевих напруги і струму, вхідної напруги і вихідного струму АВС), громіздкість обчислень (при визначенні поточних комбінацій силових ключів АВС) і залежність цих обчислень від

параметрів (активних опорів, індуктивностей і ємностей) елементів силового ланцюга. Необовідно відзначити, що у всіх відомих роботах, присвячених АВС, дуже недостатньо уваги приділено дослідженню електромагнітних процесів в ньому при функціонуванні в складі АЕП з АІС і кількісній оцінці значень енергетичних коефіцієнтів.

1.4. Аналіз управління асинхронними електроприводами з автономним інвертором струму при провалах мережевої напруги

Важливою вимогою підвищення експлуатаційної надійності частотно-регульованих АЕП є їх безаварійна робота і автоматичне повторне включення (АПВ) при провалах напруги . Це особливо необхідно для електроприводів, які працюють без постійного обслуговуючого персоналу і для яких відсутня можливість цим персоналом провести своєчасне повторне включення АЕП (як, наприклад, на необслуговуваних насосних станціях).

В існуючій вітчизняній та зарубіжній науково-технічній літературі питанню управління АЕП при провалі напруги приділено вкрай мало уваги. Зокрема, подібні дослідження відносяться лише до АЕП, створеним на основі автономного інвертора напруги (АІН) з амплітудним регулюванням або широтно-імпульсною модуляцією. При цьому запропоновані способи управління при провалі напруги не застосовні до частотно-регульованим АЕП, створеним з автономним інвертором струму, внаслідок суттєвої різниці в топології їх силових схем і особливостей їх функціонування. Єдиний описаний у відомій науково-технічній літературі спосіб управління при провалі напруги для АЕП з АІС-ШІМ, реалізований компанією Rockwell Automation в ЕП серії PowerFlex7000, дуже неефективний, оскільки при зниженні напруги менш допустимої уставки в ньому знімаються імпульси управління з силових ключів інвертора і випрямляча. Після цього двигун гальмується в режимі вільного вибігу зі зниженням магнітного потоку двигуна, через що при наступному відновленні напруги спостерігається затримка виходу зазначеного ЕП на заданий режим роботи [38].

Абсолютно відсутня в науково-технічній літературі публікації, які розглядають або досліджують управління при провалах мережевої напруги для АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного АВС. При цьому неправильне управління в цих режимах даними АЕП з АІС призводить на практиці не тільки до затримки подальшого виходу ЕП на сталий режим роботи, але навіть - до аварійних режимів в АІС і АВС і виходу їх силових елементів з ладу.

Проведений аналіз стану силових схем і автоматичного управління АЕП на основі АІС-ШІМ (з керованим випрямлячем і АВС) свідчить про те, що більш широке промислове впровадження зазначеного електропривода в різних галузях господарства в даний час стримується (навіть не дивлячись на властиві йому істотно зменшені шкідливі фактори, що впливають на двигун, в порівнянні з іншими типами частотно-регульованих АЕП) наступними основними причинами:

- 1) відносно невисокою швидкістю регулювання статорних струмів і швидкості двигуна в цьому електроприводі;
- 2) підвищеною технічною складністю реалізації більш швидкодіючих з існуючих систем автоматичного управління для АЕП з АІС-ШІМ, що створюються на основі прогнозно релейно-векторного управління;
- 3) відсутністю ефективних способів управління АЕП з АІС-ШІМ при провалах напруги;
- 4) недостатністю досліджень електромагнітних і електромеханічних процесів зазначеного електроприводу, а також - його енергетичних показників, що характеризують вплив на мережу.

1.5. Розробка математичної моделі асинхронного електроприводу з АІС-ШІМ

На рис. 1.9 представлені два варіанти досліджуваних силових електричних схем розглянутого АЕП з АІС-ШІМ: при живленні інвертора АІС від керованого випрямляча (рис. 1.9, а) або при живленні АІС від активного випрямляча струму (рис. 1.9, б).

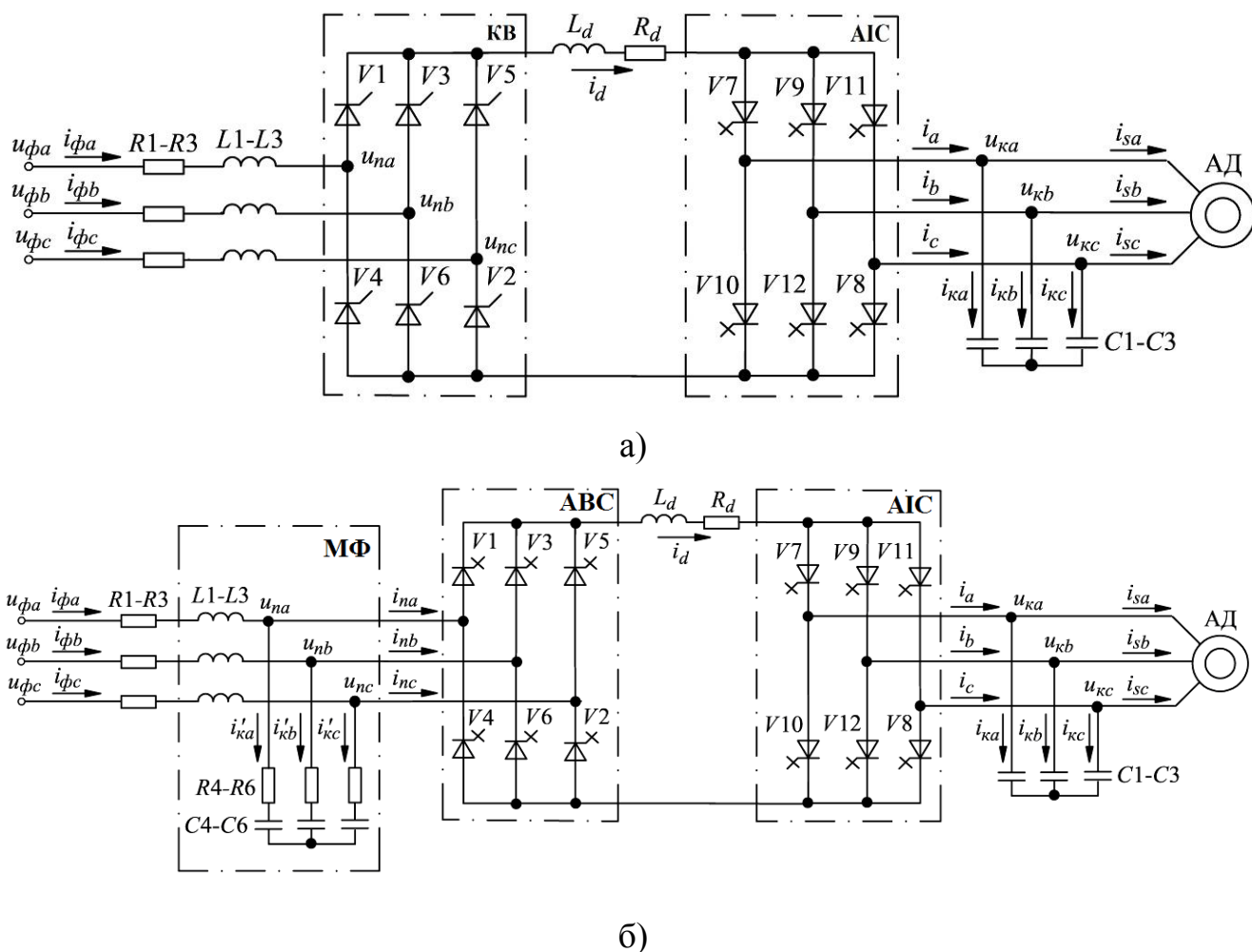


Рисунок. 1.9. - Силові електричні схеми АЕП з АІС-ШІМ, забезпеченого:
 а - тиристорним керованим випрямлячем; б - активним випрямлячем струму

Показана на рис. 1.9, а схема містить: керований випрямляч KB, виконаний у вигляді трифазного мостової схеми на одноопераційних тиристорах $V1-V6$; входні реактори $L1-L3$; згладжуючий дросель L_d ; автономний інвертор струму АІС, управління яким здійснюється способом широтно-імпульсної модуляції і виконаний за трифазною мостовою схемою на замикаючихся (двоопераційних) тиристорах $V7-V12$; конденсатори $C1-C3$; трифазний короткозамкнений асинхронний двигун АД. Для обліку впливу на електромагнітні процеси, що протікають в досліджуваних силових схемах, сумарних входних активних опорів фаз мережі і струмообмежуючих реакторів $L1-L3$, а також еквівалентного активного опору ланки постійного струму електроприводу введені відповідно резистори $R1 - R3$ і R_d .

Для поліпшення енергетичних показників (мережевого коефіцієнта потужності і загального коефіцієнта гармонік мережевих фазних струмів) застосовується схема АЕП з АІС-ШІМ, показана на рис. 1.9, б, яка відрізняється від попередньої схеми на рис. 1.9, а тим, що в її складі міститься активний випрямляч струму (АВС). Даний АВС виконаний у вигляді трифазного мостової схеми на замикаючих тиристорах V1-V6. Крім того схема АЕП на рис. 1.9, б містить додатково мережевий фільтр МФ, виконаний на конденсаторах С4-С6, резисторах R4-R6 (останні служать для демпфірування високочастотних складових струму мережі) і реакторах L1-L3 (індуктивність яких будемо вважати рівною сумі індуктивностей фаз мережі, струмообмежуючих реакторів і реакторів фільтра).

В схемах на рис. 1.9, а, б прийняті наступні позначення: $u_{\text{фа}}$, $u_{\text{фб}}$, $u_{\text{фс}}$ і $i_{\text{фа}}$, $i_{\text{фб}}$, $i_{\text{фс}}$ - відповідно фазна напруга і струми трифазної мережі; $u_{\text{на}}$, $u_{\text{нб}}$ і $u_{\text{нс}}$ - вхідні фазні напруги КВ або АВС; $u_{\text{ка}}$, $u_{\text{кб}}$, $u_{\text{кс}}$ і $i_{\text{ка}}$, $i_{\text{кб}}$, $i_{\text{кс}}$ - відповідно фазна напруга на конденсаторах С1-С3 і струми, що протікають в них; $i'_{\text{ка}}$, $i'_{\text{кб}}$ і $i'_{\text{кс}}$ - фазні струми, що протікають через конденсатори С4-С6 мережевого фільтра МФ; $i_{\text{на}}$, $i_{\text{нб}}$ і $i_{\text{нс}}$ - вхідні фазні струми АВС; $i_{\text{д}}$ - вихідний струм КВ або АВС; $i_{\text{а}}$, $i_{\text{б}}$ і $i_{\text{с}}$ - вихідні фазні струми АІС; $i_{\text{са}}$, $i_{\text{сб}}$ і $i_{\text{сс}}$ - фазні статорні струми двигуна. Перераховані позначення характеризують миттєві значення згаданих електричних величин.

В процесі функціонування розглянутого АЕП за допомогою керованого випрямляча КВ (або АВС) перетворюються змінні мережеві напруги і струми в постійні напругу і струм, що надходять після згладжування фільтром на автономний інвертор струму АІС. В інверторі постійний струм із використанням широтно-імпульсної модуляції силових ключів інвертора перетворюється в імпульсний змінний струм регульованої амплітуди і частоти, високочастотна складова якого замикається на конденсаторному фільтрі С1-С3. Таким чином на статорні обмотки двигуна надходить струм, практично рівний його основній гармоніці і синусоїдальної форми.

Для математичного опису трифазного ідеалізованого короткозамкнутого АД використовуємо систему диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами, записану в нерухомій щодо статора полярній системі координат й (зв'язаною віссю відліку аргументів з геометричною віссю фази "а" обмотки статора машини) через узагальнені вектори статорної напруги \bar{U}_s , струму \bar{I}_s і потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ двигуна у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_s &= R_s \bar{I}_s + L_\sigma \frac{d\bar{I}_s}{dt} + k \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt}, \\ L_m \bar{I}_s &= \bar{\Psi}_r + T \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} - j z \omega T \bar{\Psi}_r, \\ M &= \frac{3}{2} z k \Psi_r I_s \sin(\theta_{I_s} - \theta_{\Psi_r}), \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

в якій змінними є: узагальнені вектори \bar{I}_s і $\bar{\Psi}_r$, їх модулі I_s і Ψ_r та аргументи θ_{I_s} і θ_{Ψ_r} , а також електромагнітний момент M і швидкість ω двигуна. В математичній моделі АД, представленій системою рівнянь (1.1), перше рівняння описує коло статора двигуна, друге – коло ротора АД, третє - електромагнітний момент, четверте - рівняння руху вала ротора двигуна.

В системі (1.1) використовуються позначення: z - число пар полюсів двигуна; $j = \sqrt{-1}$ - уявна одиниця; J - момент інерції приводу, приведений до валу двигуна; M_c - момент навантаження приводу, приведений до валу двигуна; R_s - активний опір статора АД; L_m - індуктивність намагнічування АД; L_σ - сумарна індуктивність розсіювання двигуна; T - електромагнітна постійна часу ротора двигуна; k - коефіцієнт зв'язку ротора АД.

Три останніх згаданих параметра двигуна розраховуються з наступних співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} L_\sigma &= L_{\sigma s} + k L_{\sigma r}, \\ T &= (L_m + L_{\sigma r}) / R_r, \\ k &= L_m / (L_m + L_{\sigma r}) \end{aligned} \right\}, \quad (1.2)$$

де $L_{\sigma s}$ і $L_{\sigma r}$ - індуктивності розсіювання статора і ротора двигуна відповідно; R_r - активний опір ротора АД.

Використані в рівняннях системи (1.1) узагальнені вектори статорних напруги, струму і потокозчеплення ротора визначаються з відомих залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_s &= \frac{2}{3} [u_{sa} + \bar{a}u_{sb} + (\bar{a})^2 u_{sc}], \\ \bar{I}_s &= \frac{2}{3} [i_{sa} + \bar{a}i_{sb} + (\bar{a})^2 i_{sc}], \\ \bar{\Psi}_r &= \frac{2}{3} [\psi_{ra} + \bar{a}\psi_{rb} + (\bar{a})^2 \psi_{rc}] \end{aligned} \right\}, \quad (1.3)$$

а модулі I_s і Ψ_r , а також аргументи θ_{I_s} і θ_{Ψ_r} згаданих векторів - із співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} I_s &= \left[\frac{2}{3} (i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2) \right]^{1/2}, \\ \Psi_r &= \left[\frac{2}{3} (\psi_{ra}^2 + \psi_{rb}^2 + \psi_{rc}^2) \right]^{1/2}, \\ \theta_{I_s} &= \text{sign}(i_{sa}) \cdot \arcsin \left(\frac{i_{sb} - i_{sc}}{\sqrt{3}I_s} \right) + \frac{\pi}{2} [1 - \text{sign}(i_{sa})], \\ \theta_{\Psi_r} &= \text{sign}(\psi_{ra}) \cdot \arcsin \left(\frac{\psi_{rb} - \psi_{rc}}{\sqrt{3}\Psi_r} \right) + \frac{\pi}{2} [1 - \text{sign}(\psi_{ra})] \end{aligned} \right\}. \quad (1.4)$$

У залежностях (1.3) і (1.4) прийняті наступні позначення: ψ_{ra} , ψ_{rb} і ψ_{rc} - фазні потокозчеплення ротора двигуна; u_{sa} , u_{sb} , u_{sc} - фазні статорні напруги двигуна; $\bar{a} = e^{j2\pi/3}$ - поворотний множник (в якому e - основа експоненти); sign - математична операція виділення знака числа, яка визначає для дійсного числа A його знак у вигляді:

$$\text{sign}A = \begin{cases} +1, & \text{при } A > 0; \\ 0, & \text{при } A = 0; \\ -1, & \text{при } A < 0. \end{cases} \quad (1.5)$$

Із аналізу представлених на рис. 1.9 силових електричних схем АЕП з АІС-ШІМ слідує, що при управлінні силовими ключами АІС необхідно дотримуватися таких умов:

1) безперервності протікання випрямленого струму через згладжуючий L_d дросель;

2) в робочих режимах трифазного АІС одночасно відкрито два силових ключа в його одній або різних фазах: по одному в анодній і катодній групах інвертора.

Таким чином, для трифазного мостового АІС можливі дев'ять допустимих комбінацій включення його силових ключів, що визначають два види управління силовими ключами трифазного АІС. При першому виді управління в провідному стані знаходяться по одному силовому ключу в анодній і по одному силовому ключу в катодній групах різних фаз інвертора. Відповідно до другого виду управління можуть бути одночасно відкриті в одній з фаз інвертора силові ключі з анодної і катодної груп. При описаних вище видах управління на виході АІС формуються фазні струми, i_a , i_b і i_c :

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I \cos \theta_I, \\ i_b &= I \cos(\theta_I - 2\pi/3), \\ i_c &= I \cos(\theta_I + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

і відповідний їм узагальнений вектор вихідного струму інвертора \bar{I} з амплітудою I і аргументом θ_I , що розраховується з співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I} &= I e^{j\theta_I}, \\ I &= \left[\frac{2}{3} (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) \right]^{1/2}, \\ \theta_I &= \text{sign}(i_a) \cdot \arcsin\left(\frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}I}\right) + \frac{\pi}{2} [1 - \text{sign}(i_a)] \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

При управлінні силовими ключами АІС-ШІМ можливе створення одного нульового (при $m = 7, 8, 9$) значення і шести різних між собою ненульових (при $m = 1, 2, \dots, 6$) значень узагальнених векторів вихідного струму АІС-ШІМ (що характеризуються однаковими амплітудами I , чисельно рівними $2i_d/\sqrt{3}$, і фазовими зсувами аргументів θ_I між собою на кути, кратні $\pi/3$). Запропоновано для всіх можливих комбінацій m відкритих і закритих силових ключів інвертора

визначати значення узагальнених векторів вихідного струму інвертора $\bar{I}(m)$, їх модулі $I(m)$ і аргументи $\theta_I(m)$ з залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}(m) &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[1 - \frac{m}{7} \right]^* \cdot i_d e^{j(2m-1)\pi/6}, \\ I(m) &= \frac{2}{\sqrt{3}} i_d \left[1 - \frac{m}{7} \right]^*, \\ \theta_I(m) &= \frac{\pi}{6} (2m-1) \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

де $[]^*$ - математична операція виділення цілої частини числа.

З урахуванням співвідношень (1.8) побудована векторна діаграма на рис. 1.10, яка ілюструє розташування на комплексній площині всіх можливих до створення (при різних комбінаціях m силових ключів АІС-ШІМ) узагальнених векторів вихідного струму $\bar{I}(m)$ інвертора. На даній діаграмі представлені в нерухомій щодо статора ортогональній системі координат (ОСК).

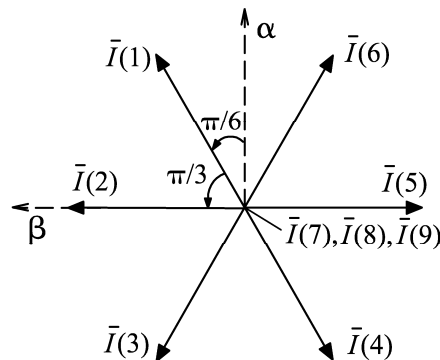


Рисунок 1.10. - Векторна діаграма узагальнених векторів вихідного струму АІС

“ $\alpha - \beta$ ” (орієнтованою віссю “ α ” по геометричній осі фази “ a ” статорної обмотки двигуна) створювані на виході інвертора узагальнені вектори струму, $\bar{I}(1), \bar{I}(2), \dots, \bar{I}(9)$, які відповідають умовно прийнятим позначенням номером m комбінації відкритих і закритих силових ключів інвертора ($m = 1, 2, \dots, 9$).

Для розробки математичного опису системи “інвертор струму - двигун” складена схема заміщення АЕП з АІС-ШІМ, наведена на рис. 1.11. В даній схемі кожна з фаз АД представлена послідовним з'єднанням елементів: активного опору R_s статора, сумарною індуктивністю L_σ розсіювання і фазної ЕРС ротора e_{ra}, e_{rb}

або e_{rc} (приведеної до статора двигуна), а вихідна напруга керованого (або активного) випрямляча задається еквівалентним джерелом напруги u_d .

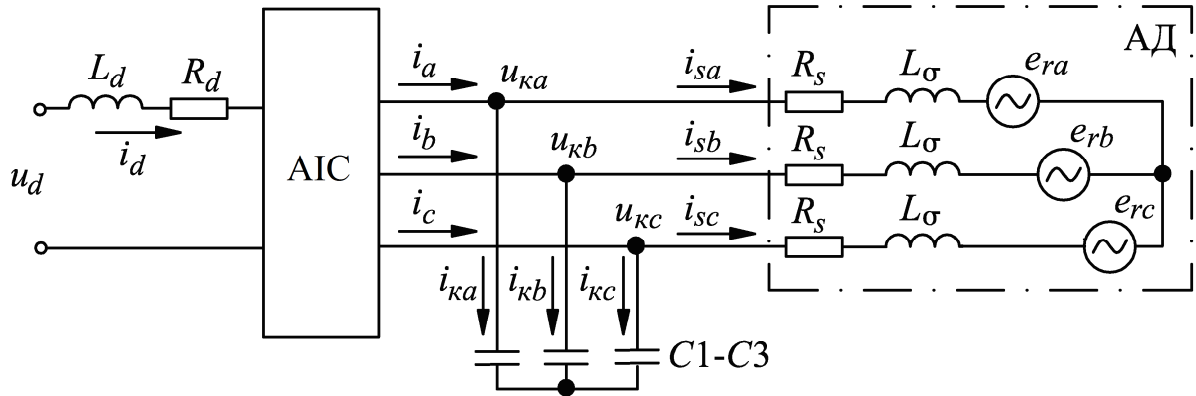


Рисунок 1.11. - Спрощена схема заміщення АЕП з АІС-ШІМ

Виходячи зі схеми заміщення на рис. 1.11, математично опишемо систему "інвертор струму - двигун" в фазних значеннях електричних параметрів АІС-ШІМ та двигуна наступною системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned}
 i_a &= i_{ka} + i_{sa}, \\
 u_{ka} &= \frac{1}{C_1} \int_0^t i_{ka} dt + u_{ka}(0), \\
 u_{sa} &= u_{ka} = R_s i_{sa} + L_\sigma \frac{di_{sa}}{dt} + e_{ra}, \\
 i_b &= i_{kb} + i_{sb}, \\
 u_{kb} &= \frac{1}{C_2} \int_0^t i_{kb} dt + u_{kb}(0), \\
 u_{sb} &= u_{kb} = R_s i_{sb} + L_\sigma \frac{di_{sb}}{dt} + e_{rb}, \\
 i_c &= i_{kc} + i_{sc}, \\
 u_{kc} &= \frac{1}{C_3} \int_0^t i_{kc} dt + u_{kc}(0), \\
 u_{sc} &= u_{kc} = R_s i_{sc} + L_\sigma \frac{di_{sc}}{dt} + e_{rc}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

де $u_{ka}(0)$, $u_{kb}(0)$ і $u_{kc}(0)$ - початкові значення фазної напруги на конденсаторах С1 - С3; C_1 , C_2 і C_3 - значення ємностей конденсаторів в схемах на рис. 1.9 (які далі будемо вважати рівними: $C1 = C2 = C3 = C_{II}$); t – поточний час.

Для побудови математичної моделі керованого випрямляча та ланки постійного струму розглянемо змінні за синусоїдальним законом від часу t симетричні фазні напруги:

$$\left. \begin{aligned} u_{\phi a} &= U_{\phi m} \sin(\omega_{\phi} t), \\ u_{\phi b} &= U_{\phi m} \sin(\omega_{\phi} t - 2\pi/3), \\ u_{\phi c} &= U_{\phi m} \sin(\omega_{\phi} t + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Узагальнений вектор мережевої фазної напруги \bar{U}_{ϕ} (з модулем U_{ϕ} і аргументом θ_{ϕ}):

$$\bar{U}_{\phi} = U_{\phi} e^{j\theta_{\phi}}, \quad (1.11)$$

для якого справедливі співвідношення

$$\left. \begin{aligned} U_{\phi} &= U_{\phi m}, \\ \omega_{\phi} &= 2\pi f_{\phi}, \\ \theta_{\phi} &= \omega_{\phi} t \end{aligned} \right\}, \quad (1.12)$$

де $f_{\phi} = 50$ Гц - частота мережевих фазних напруг.

Виходячи із принципу функціонування тиристорного випрямляча, запропоновано визначати миттєву напругу на виході керованого випрямляча (без урахування кута комутації тиристорів і при ідеальному поданні його тиристорів, а також при безперервному вихідному струмі випрямляча) із залежності:

$$u_d = (k_1 - k_4) \cdot u_{\phi a} + (k_3 - k_6) \cdot u_{\phi b} + (k_5 - k_2) \cdot u_{\phi c} \quad (1.13)$$

В останній залежності використовуються наступні коефіцієнти: k_1, k_2, \dots, k_6 , - кожен з яких приймає тільки два можливих значення: "0" або "1", - в залежності від величини аргументу θ_{ϕ} узагальненого вектора напруги. Причому зазначені коефіцієнти приймають значення, рівні одиниці, при наступних значеннях аргументу θ_{ϕ} вектора напруги:

$$\left. \begin{aligned} k1 &= 1, \text{ якщо } -\pi/3 + \alpha_y < \theta_\phi \leq \pi/3 + \alpha_y; \\ k2 &= 1, \text{ якщо } 0 + \alpha_y < \theta_\phi \leq 2\pi/3 + \alpha_y; \\ k3 &= 1, \text{ якщо } \pi/3 + \alpha_y < \theta_\phi \leq \pi + \alpha_y; \\ k4 &= 1, \text{ якщо } 2\pi/3 + \alpha_y < \theta_\phi \leq 4\pi/3 + \alpha_y; \\ k5 &= 1, \text{ якщо } \pi + \alpha_y < \theta_\phi \leq 5\pi/3 + \alpha_y; \\ k6 &= 1, \text{ якщо } 4\pi/3 + \alpha_y < \theta_\phi \leq 2\pi + \alpha_y \end{aligned} \right\}, \quad (1.14)$$

де α_y - кут управління відкриттям тиристорів КВ (відлічуваний від кута природного комутації). При цьому кожен із зазначених коефіцієнтів $k1, k2, \dots, k6$ перетворюється в "0", якщо відповідна йому нерівність з (1.14) не виконується.

Електромагнітні процеси в ланці постійного струму перетворювача частоти з АІС описуються залежністю:

$$u_d = R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + u_{II}, \quad (1.15)$$

де u_{II} - напруга на вході АІС.

При цьому миттєву вхідну напругу u_{II} інвертора можна наближено визначити (нехтуючи втратами потужності в силових елементах інвертора, так як вони на практиці відносно малі) виходячи з балансу миттєвих значень активних потужностей на вході і виході АІС у вигляді:

$$u_{II} \approx [u_{ka}i_a + u_{kb}i_b + u_{kc}i_c]/i_d = \frac{3}{2} [\bar{U}_\kappa \times \hat{I}]/i_d, \quad (1.16)$$

де \hat{I} - узагальнений вектор, пов'язаний з вектором \bar{I} вихідного струму інвертора; \bar{U}_κ - узагальнений вектор напруги на конденсаторах, що обчислюється згідно залежності:

$$\bar{U}_\kappa = \frac{2}{3} [u_{ka} + \bar{a}u_{kb} + (\bar{a})^2 u_{kc}]. \quad (1.17)$$

При побудові математичної моделі активного випрямляча струму, підключеного до трифазної мережі повинні дотримуватися ідентичні умови, при яких забезпечується безперервність перебігу випрямленого струму і в будь-який момент часу в провідному стані знаходяться тільки два силових ключа.

На вході ABC формуються фазні струми i_{na} , i_{nb} і i_{nc} , через які можна розрахувати відповідний їм узагальнений вектор вхідного струму випрямляча (з амплітудою і аргументом) у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_n &= I_n e^{j\theta_n}, \\ I_n &= \left[\frac{2}{3} (i_{na}^2 + i_{nb}^2 + i_{nc}^2) \right]^{1/2}, \\ \theta_n &= [\text{sign}(i_{na})] \cdot \arcsin \left(\frac{i_{nb} - i_{nc}}{\sqrt{3} I_n} \right) + \frac{\pi}{2} [1 - \text{sign}(i_{na})] \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

Для комбінацій $n = 1, 2, \dots, 6$ силових ключів значення модуля $I_n(n)$ узагальненого вектора вхідного струму ABC визначаються поточним значенням струму i_d в ланці постійного струму, а аргументу $\theta_n(n)$ - обраною комбінацією силових ключів ABC. При комбінаціях $n = 7, 8, 9$ силових ключів ABC значення згаданих векторів і їх модулів дорівнюють нулю: $I_n(n) = 0$ і $\bar{I}_n(n) = 0$.

Для будь-якої з дев'яти можливих комбінацій ($n = 1, 2, \dots, 9$) відкритих і закритих силових ключів ABC розрахуємо миттєве значення випрямленої напруги:

$$u_d i_d \approx \frac{3}{2} \text{Re} \left[\bar{U}_n \times \hat{I}_n \right] \quad (1.19)$$

Виходячи з балансу миттєвих активних потужностей на вході і виході випрямляча (з урахуванням зневаги втратами потужності в силових ключах ABC, частка яких від значення вхідної або вихідної потужності на практиці мала).

З урахуванням (1.19) визначимо напругу у вигляді:

$$u_d \approx \frac{3}{2} \text{Re} \left[\bar{U}_n \times \hat{\Phi}_T \right] \quad (1.20)$$

При цьому в співвідношеннях (1.19) і (1.20) використовуються позначення: \hat{I}_n - узагальнений вектор, спряжений вектору вхідного струму \bar{I}_n ABC; $\hat{\Phi}_T$ - пов'язаний вектор комутаційної функції ABC; \bar{U}_n - узагальнений вектор вхідної напруги випрямляча, - розраховуються з наступних залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \hat{I}_n &= I_n e^{-j\theta_n}, \\ \hat{\Phi}_T &= \hat{I}_n / i_d, \\ \bar{U}_n &= \frac{2}{3} [u_{na} + \bar{a}u_{nb} + (\bar{a})^2 u_{nc}] \end{aligned} \right\}. \quad (1.21)$$

З урахуванням виразу, що визначає узагальнений вектор вхідного струму ABC через його відповідні фазні значення i_{na} , i_{nb} , i_{nc} :

$$\bar{I}_n = \frac{2}{3} [i_{na} + \bar{a}i_{nb} + (\bar{a})^2 i_{nc}] \quad (1.22)$$

Представимо другу залежність з (1.21) в наступному вигляді:

$$\hat{\Phi}_T = \frac{2}{3} [\Phi_a + (\bar{a})^2 \Phi_b + \bar{a} \Phi_c], \quad (1.23)$$

де Φ_a , Φ_b і Φ_c - комутаційні функції (які мають одне з трьох допустимих значень: -1, 0 або 1, - в залежності від поточної обраної комбінації відкритих силових ключів ABC), які визначаються з співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_a &= i_{na} / i_d, \\ \Phi_b &= i_{nb} / i_d, \\ \Phi_c &= i_{nc} / i_d \end{aligned} \right\}. \quad (1.24)$$

Причому вхідні фазні струми i_{na} , i_{nb} , i_{nc} можуть бути визначені з наступних співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} i_{na} &= I_n \cos \theta_n, \\ i_{nb} &= I_n \cos(\theta_n - 2\pi/3), \\ i_{nc} &= I_n \cos(\theta_n + 2\pi/3) \end{aligned} \right\}. \quad (1.25)$$

Аналогічно можуть бути отримані залежності для знаходження узагальненого вектора вхідного струму і узагальненого вектора комутаційної функції ABC:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_n &= \bar{\Phi}_T \cdot i_d, \\ \bar{\Phi}_T &= \frac{2}{3} [\Phi_a + \bar{a} \Phi_b + (\bar{a})^2 \Phi_c] \end{aligned} \right\}. \quad (1.26)$$

При цьому згадані комутаційні функції з урахуванням залежностей (1.5) можуть бути визначені також з інших співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_a &= \text{sign}(i_{na}), \\ \Phi_b &= \text{sign}(i_{nb}), \\ \Phi_c &= \text{sign}(i_{nc}) \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

Наведена на рис. 1.12 векторна діаграма ілюструє в нерухомій ОКС “ $\alpha - \beta$ ” (орієнтованою віссю абсцис “ α ” по геометричній осі обмотки фази “ a ” силового трансформатора трифазної мережі) створювані на вході ABC узагальнені вектори струму $\bar{I}_n(1), \bar{I}_n(2), \dots, \bar{I}_n(9)$. На цій векторній діаграмі показані для кожної з допустимих комбінацій n відкритих і закритих силових ключів ABC відповідні їм узагальнені вектори струму на вході випрямляча $\bar{I}_n(n)$, рівні нулю (вектори $\bar{I}(7) = \bar{I}(8) = \bar{I}(9) = 0$) – при $n = 7, 8, 9$ або нерухомим ненульовим векторами $\bar{I}(1), \bar{I}(2), \dots, \bar{I}(6)$ – при $n = 1, 2, \dots, 6$.

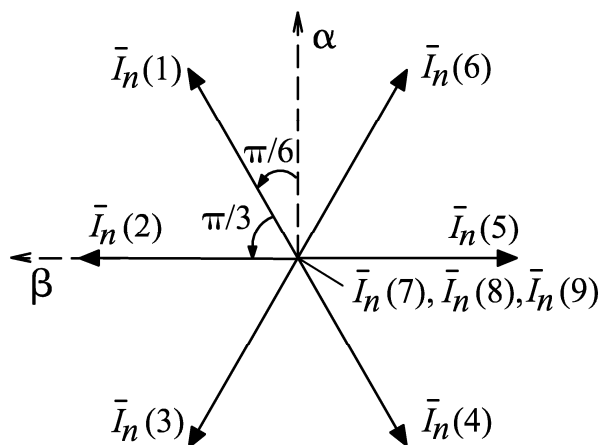


Рисунок 1.12. - Створювані узагальнені вектори вхідного струму ABC

Виходячи з рис. 1.12, запропоновані математичні залежності для знаходження значень узагальненого вектора $\bar{I}_n(n)$ вхідного струму ABC його модуля $I_n(n)$ і аргументу $\theta_n(n)$ в залежності від усіх можливих комбінацій ($n = 1, 2, \dots, 9$) силових ключів зазначеного випрямляча:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_n(n) &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[1 - \frac{n}{7} \right]^* \cdot i_d \cdot e^{j(2n-1)\pi/6}, \\ I_n(n) &= \frac{2}{\sqrt{3}} i_d \left[1 - \frac{n}{7} \right]^*, \\ \theta_n(n) &= \frac{\pi}{6} (2n-1) \end{aligned} \right\}, \quad (1.28)$$

які з вигляду аналогічним залежностям (1.8), отриманим раніше для АІС.

Математичний опис системи "трифазна мережа живлення - активний випрямляч" в значеннях фазних електричних параметрів представимо системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} i_{\phi a} &= i'_{ka} + i_{na}, \\ u_{na} &= \frac{1}{C_4} \int_0^t i'_{ka} dt + R_4 \cdot i'_{ka} + u'_{ka}(0), \\ u_{\phi a} &= R_1 \cdot i_{\phi a} + L_1 \frac{di_{\phi a}}{dt} + u_{na}, \\ i_{\phi b} &= i'_{kb} + i_{nb}, \\ u_{nb} &= \frac{1}{C_5} \int_0^t i'_{kb} dt + R_5 \cdot i'_{kb} + u'_{kb}(0), \\ u_{\phi b} &= R_2 \cdot i_{\phi b} + L_2 \frac{di_{\phi b}}{dt} + u_{nb}, \\ i_{\phi c} &= i'_{kc} + i_{nc}, \\ u_{nc} &= \frac{1}{C_6} \int_0^t i'_{kc} dt + R_6 \cdot i'_{kc} + u'_{kc}(0), \\ u_{\phi c} &= R_3 \cdot i_{\phi c} + L_3 \frac{di_{\phi c}}{dt} + u_{nc} \end{aligned} \right\}, \quad (1.29)$$

де $u_{\phi a}$, $u_{\phi b}$, $u_{\phi c}$ і $i_{\phi a}$, $i_{\phi b}$, $i_{\phi c}$ - відповідно мережеві фазні напруги і струми; u'_{ka} , u'_{kb} , u'_{kc} і i'_{ka} , i'_{kb} , i'_{kc} - відповідно напруги і струми на конденсаторах С4-С6; $u'_{ka}(0)$, $u'_{kb}(0)$ і $u'_{kc}(0)$ - початкові (для $t = 0$) фазні напруги на конденсаторах С4 - С6; R_1 , R_2 , R_3 і C_4 , C_5 , C_6 - значення активних опорів і ємностей відповідно резисторів $R1 - R3$ і конденсаторів $C4 - C6$ в схемі на рис. 1.9; L_1 , L_2 , L_3 - значення індуктивностей реакторів в схемі на рис. 1.9.

1.6. Розрахункові залежності для енергетичних показників електропривода

В якості основних енергетичних показників для АЕП з АІС-ШІМ досліджувались:

- мережевий коефіцієнт потужності:

$$K_M = P/S. \quad (1.30)$$

де середні значення активної P і повної потужності S обчислювалися з співвідношень:

$$P = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (u_{\phi a} i_{\phi a} + u_{\phi b} i_{\phi b} + u_{\phi c} i_{\phi c}) dt, \quad (1.31)$$

$$S = U_{\phi aД} I_{\phi aД} + U_{\phi bД} I_{\phi bД} + U_{\phi cД} I_{\phi cД}, \quad (1.32)$$

де $u_{\phi a}$, $u_{\phi b}$, $u_{\phi c}$ і $i_{\phi a}$, $i_{\phi b}$, $i_{\phi c}$ - миттєві значення мережевих фазних напруг і струмів відповідно; T_1 - період напруги; $U_{\phi aД}$, $U_{\phi bД}$, $U_{\phi cД}$ і $I_{\phi aД}$, $I_{\phi bД}$, $I_{\phi cД}$ - діючі значення мережевих фазних напруг і струмів відповідно, розраховуються у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} U_{\phi aД} &= \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u_{\phi a}^2 dt}, & I_{\phi aД} &= \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_{\phi a}^2 dt}, \\ U_{\phi bД} &= \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u_{\phi b}^2 dt}, & I_{\phi bД} &= \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_{\phi b}^2 dt}, \\ U_{\phi cД} &= \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u_{\phi c}^2 dt}, & I_{\phi cД} &= \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_{\phi c}^2 dt}, \end{aligned} \right\} \quad (1.33)$$

Загальні коефіцієнти гармонік мережевого струму і статорних струму і напруги АД визначалися з наступних залежностей:

$$K_{\Gamma 1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N I_{\phi m}^2(\vartheta)}}{I_{\phi m}(1)}, \quad (1.34)$$

$$K_{\Gamma 2} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N I_{sm}^2(\vartheta)}}{I_{sm}(1)}, \quad (1.35)$$

$$K_{ГЗ} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N U_{sm}^2(9)}}{U_{sm}(1)}, \quad (1.36)$$

де $I_{\phi m}(1)$, $I_{sm}(1)$ і $U_{sm}(1)$ - значення першої гармоніки для фазного мережевого струму і фазних статорних струму і напруги двигуна відповідно.

Коефіцієнт пульсацій вихідного струму випрямляча розраховувався зі співвідношення:

$$K_{П} = 0,5 \cdot (I_{d \max} - I_{d \min}) / \left(\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_d dt \right) \quad (1.37)$$

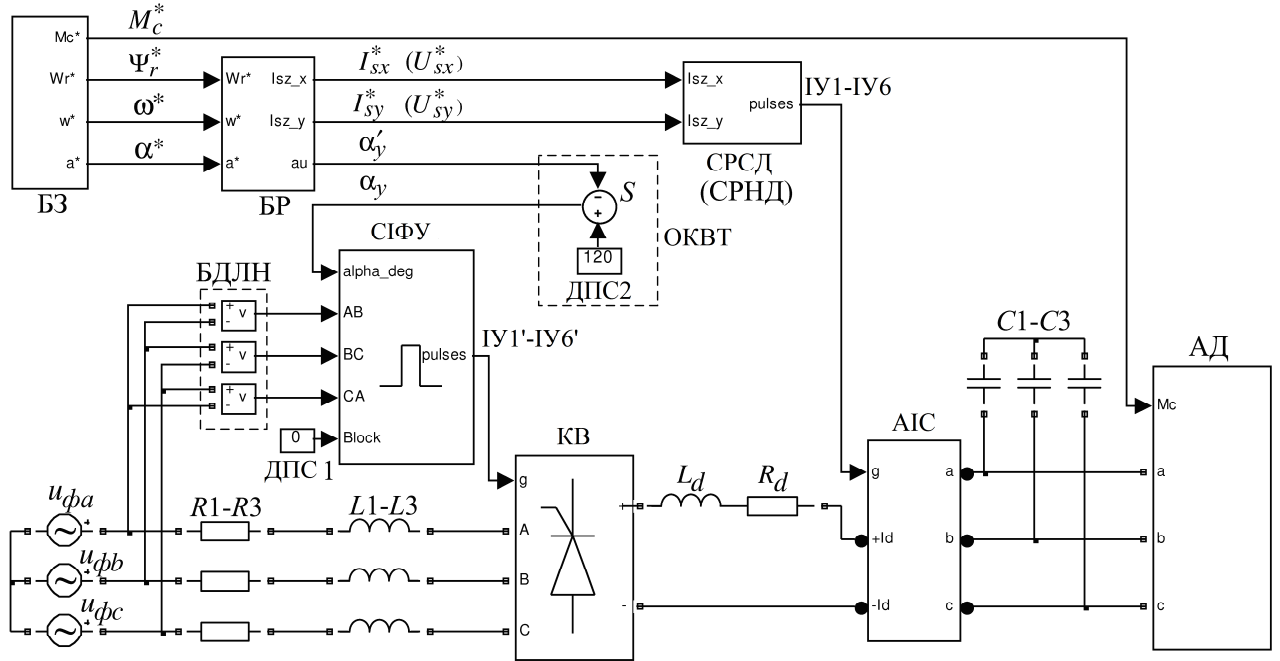
де $I_{d \max}$ і $I_{d \min}$ - відповідно максимальне і мінімальне значення вихідного струму випрямляча за розрахунковий час періоду.

1.7. Імітаційні моделі асинхронного електроприводу з АІС-ШІМ

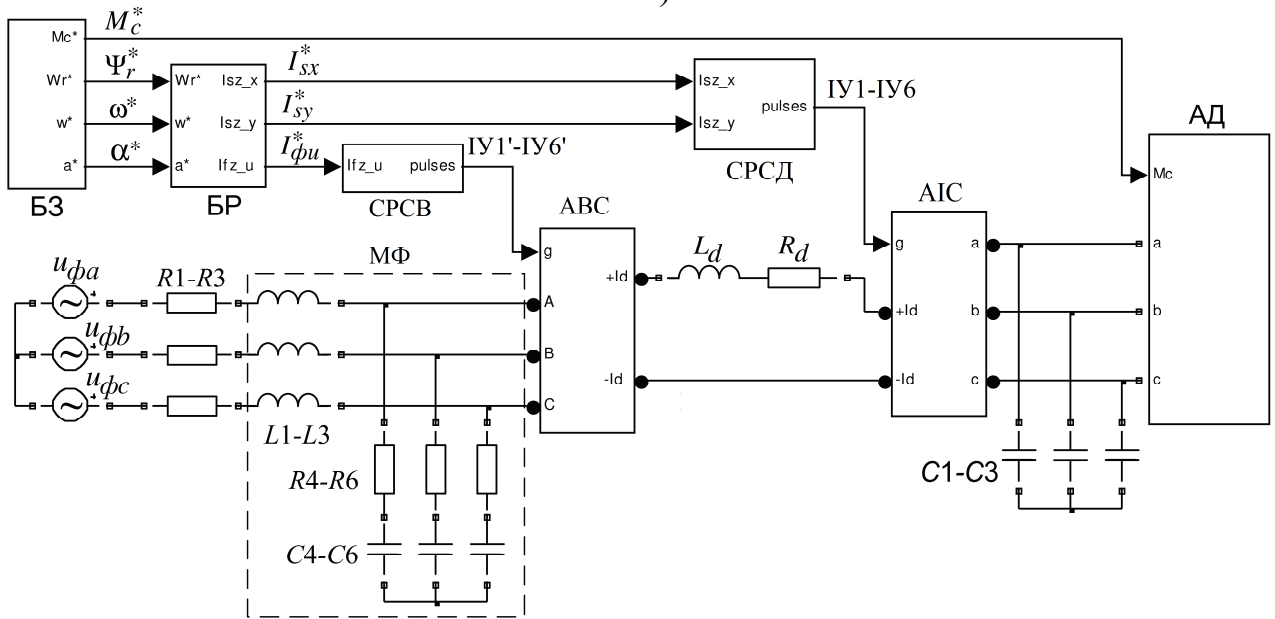
В магістерській роботі імітаційне моделювання АЕП з АІС-ШІМ виконано в пакеті програм MATLAB. Для створення імітаційних моделей використовувалися блоки бібліотек Simulink і SimPowerSystems. Для моделювання імітаційних моделей був обраний в якості методу інтегрування неявний метод Рунге-Кутта, застосовуваний на початку рішення, і метод с змінним кроком розрахунку при подальшому вирішенні. Розроблені імітаційні моделі призначені для дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів, а також енергетичних показників АЕП з АІС-ШІМ.

На рис. 1.13 представлені імітаційні моделі АЕП з АІС-ШІМ при живленні: від керованого випрямляча (рис. 1.13, а) і активного випрямляча струму (рис. 1.13, б). Дані моделі містять: джерела змінної напруги $u_{\phi a}$, $u_{\phi b}$ і $u_{\phi c}$; резистори $R1 - R3$ і R_d ; реактори $L1 - L3$ і дросель L_d ; керований випрямляч КВ; автономний інвертор струму АІС; конденсатори; асинхронний – короткозамкнутий двигун АД; блок завдання БЗ; блок регуляторів БР; блок датчиків лінійних напруг БДЛН; систему імпульсно-фазового управління СІФУ; обчислювач кута відкриття тиристорів ОКВТ; систему регулювання струму

двигуна СРСД (або систему регулювання напруги двигуна СРНД); суматор; джерело постійних сигналів ДПС1 і ДПС2; мережевий фільтр МФ, що складається з резисторів, конденсаторів і реакторів; активний випрямляч струму АВС; систему регулювання струму випрямляча СРСВ. Тут і далі в схемах імітаційних моделей використовуються стандартні позначення, прийняті в програмі MatLab.



а)



б)

Рисунок 1.13. - Імітаційні моделі АЕП з АІС-ШІМ:

а - керованим тиристорним випрямлячем; б - активним випрямлячем струму

У розглянутих моделях на виході блоку завдання БЗ формуються сигнали завдань моменту навантаження двигуна M_c^* , потокозчеплення ротора Ψ_r^* , швидкості ω^* АД і положення α^* вала його ротора. За допомогою трьох останніх сигналів на виході блоку регуляторів БР обчислюються: задані значення активної I_{sy}^* (або U_{sy}^*) і реактивної I_{sx}^* (або U_{sx}^*) проекції узагальненого вектора статорного струму (або напруги) двигуна. Додатково на виході БР визначаються: для моделі на рис. 1.13, а - кут α'_y управління тиристорами, а для моделі на рис. 1.13 б - завдання активної проекції $I_{\phi u}^*$ узагальненого вектора мережевого струму.

Через значення згаданого кута α'_y на виході ОКВТ (рис .1.13, а) перебуває (з урахуванням кута узгодження, рівного 120 ел. град.) фактичний кут управління тиристорами випрямляча. За допомогою даного значення кута і інформації про мережевих лінійних напругах (визначаються блоком датчиків БДЛН) на виході СІФУ формуються імпульси управління відкриттям тиристорів, керованого випрямляча КВ. Дані імпульси можуть бути заборонені (зняті) на виході СІФУ при наявності вихідного сигналу блоку ДПС1, рівного лог. "1". У схемі моделі на рис. 1.13, б по згаданому заданому значенню активної проекції узагальненого вектора струму мережі за допомогою системи СРСВ формуються імпульси управління силовими ключами АВС.

По зазначеним заданим проекціям I_{sx}^* (або U_{sx}^*) і I_{sy}^* (або U_{sy}^*) вектора статорного струму \bar{I}_s^* (або напруги \bar{U}_s^*) системою СРСД (або СРНД) обчислюються імпульси управління ІУ1-ІУ6 силовими ключами АІС.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз відомих силових схем асинхронного електроприводу на основі автономного інвертора струму.
2. Запропоновано математичний опис АІС і АВС.
3. Створені цифрові імітаційні моделі призначені для дослідження в сталих і перехідних режимах роботи АЕП з АІС-ШІМ його електромагнітних і електромеханічних процесів (з урахуванням запропонованих способів автоматичного управління), а також енергетичних показників.
4. Розроблений для АЕП з АІС-ШІМ математичний опис і створені на його основі цифрові імітаційні моделі враховують фактичні дискретні властивості і несинусоїдальну форму вхідних і вихідних струмів і напруг розглянутого АЕП, що дозволяє наблизити розраховані з їх допомогою електромагнітні процеси до реальних значень.

В отриманій еквівалентній схемі прийняті наступні позначення: ДС - джерело струму; $u_{\phi a}$, $u_{\phi b}$ і $u_{\phi c}$ - фазні напруги мережі живлення (що надходять з вторинних обмоток силового трансформатора); $i_{\phi a}$, $i_{\phi b}$ і $i_{\phi c}$ - мережеві фазні струми; i_{na} , i_{nb} , i_{nc} і u_{na} , u_{nb} , u_{nc} - вхідні фазні струми і напруги АВС відповідно; i'_{ka} , i'_{kb} і i'_{kc} - струми конденсаторів С4-С6 мережевого фільтра. При цьому джерело струму ДС представляє собою еквівалентну заміну частини силової схеми, показаної на рис. 1.9, б, і включає в себе: дросель L_d , активний опір R_d , інвертор струму АІС, конденсатори С1-С3 і двигун АД.

Перейшовши від фазних значень напруг і струмів мережі живлення і АВС до узагальнених векторів, отримаємо для довільного часового міжкомутаційного інтервалу силових ключів АВС еквівалентну схему заміщення системи: "трифазна мережа живлення - активний випрямляч струму", яка показана на рис. 2.2, де: ДС* - джерело узагальненого вектора вхідного струму \bar{I}_n трифазного АВС; \bar{U}_ϕ - джерело узагальненого вектора напруги вторинної обмотки силового трансформатора; \bar{U}_n - узагальнений вектор вхідної напруги АВС; \bar{I}_ϕ і \bar{I}'_k - узагальнені вектори, утворені відповідно мережевими фазними струмами і струмами, що протікають через конденсатори С4-С6 ємністю C_k .

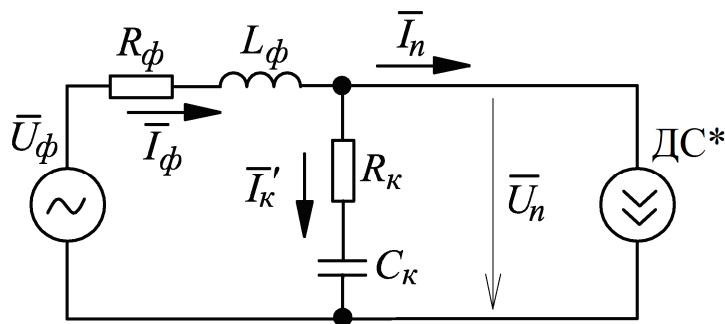


Рисунок. 2.2. - Еквівалентна схема заміщення системи: "трифазна мережа - активний випрямляч струму", складена в узагальнених векторах електричних параметрів

Під міжкомутаційним інтервалом силових ключів АВС будемо розуміти поточний часовий інтервал тривалістю між сусідніми комутаціями силових ключів АВС:

$$0 \leq \tau' \leq \tau'_k, \quad (2.1)$$

де τ'_k - загальна тривалість розглянутого поточного міжкомутаційного інтервалу АВС.

При цьому для даної схеми заміщення на рис. 2.2 справедливі наступні співвідношення для елементів силового ланцюга:

$$\left. \begin{aligned} R1 = R2 = R3 = R_\phi, \\ L1 = L2 = L3 = L_\phi, \\ R4 = R5 = R6 = R_\kappa, \\ C4 = C5 = C6 = C_\kappa \end{aligned} \right\}, \quad (2.2)$$

а згадані вище узагальнені вектори обчислюються через відповідні їм фазні значення:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_\phi &= \frac{2}{3} [u_{\phi a} + (\bar{a})u_{\phi b} + (\bar{a})^2 u_{\phi c}], \\ \bar{I}_\phi &= \frac{2}{3} [i_{\phi a} + (\bar{a})i_{\phi b} + (\bar{a})^2 i_{\phi c}], \\ \bar{U}_n &= \frac{2}{3} [u_{na} + (\bar{a})u_{nb} + (\bar{a})^2 u_{nc}], \\ \bar{I}'_\kappa &= \frac{2}{3} [i'_{\kappa a} + (\bar{a})i'_{\kappa b} + (\bar{a})^2 i'_{\kappa c}] \end{aligned} \right\}. \quad (2.3)$$

Виходячи з еквівалентної схеми заміщення, показаної на рис. 2.2, а також залежностей (1.29), опишемо в узагальнених векторах для довільного міжкомутаційного інтервалу АВС електромагнітні процеси, що протікають в системі: "трифазна мережа - активний випрямляч струму":

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_\phi &= \bar{I}'_\kappa + \bar{I}_n, \\ \bar{U}_\phi &= R_\phi \bar{I}_\phi + L_\phi \frac{d\bar{I}_\phi}{d\tau'} + \bar{U}_n, \\ \bar{U}_n &= \bar{U}'_\kappa(0) + R_\kappa \bar{I}'_\kappa + \frac{1}{C_\kappa} \int_0^{\tau'} \bar{I}'_\kappa dt' \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

де $\bar{U}'_\kappa(0)$ - узагальнений вектор початкової напруги на конденсаторах С4-С6 (відповідний моменту часу $\tau' = 0$ початку розглянутого інтервалу).

Операторне зображення узагальненого вектора вхідного струму ABC має вигляд:

$$\bar{I}_n(p) = \frac{\bar{I}_n(0)}{p}, \quad (2.5)$$

де $\bar{I}_n(0)$ - узагальнений вектор вхідного струму ABC, відповідний моменту часу $\tau' = 0$ початку міжкомутаційного інтервалу активного випрямляча струму; p - оператор Лапласа.

При цьому вектор обчислюється з урахуванням співвідношень (1.28) відповідно до наступної залежності:

$$\bar{I}_n(0) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[1 - \frac{n}{7} \right]^* \cdot i'_d(0) \cdot e^{j(2n-1)\pi/6}, \quad (2.6)$$

де $i'_d(0)$ - вихідний струм ABC, відповідний моменту часу $\tau' = 0$.

Відповідно прийнятим допущенням про синусоїдальності і симетрії фазних напруг мережі живлення, знайдемо відповідний їм узагальнений вектор:

$$\bar{U}_\phi = \bar{U}_\phi(0) e^{j\omega_\phi \tau'}, \quad (2.7)$$

де $\bar{U}_\phi(0)$ - початкове значення розглянутого узагальненого вектора; ω_ϕ - частота основної гармоніки напруги мережі живлення.

Виходячи з (2.7), операторне зображення узагальненого вектора мережевої напруги буде мати вигляд:

$$\bar{U}_\phi(p) = \frac{\bar{U}_\phi(0)}{p - j\omega_\phi}. \quad (2.8)$$

З урахуванням отриманих залежностей (2.5) і (2.8) представимо систему рівнянь (2.4) в операційному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_\phi(p) &= \frac{\bar{I}_n(0)}{p} + \bar{I}'_\kappa(p), \\ \frac{\bar{U}_\phi(0)}{p - j\omega_\phi} &= R_\phi \bar{I}_\phi(p) + pL_\phi \bar{I}_\phi(p) - L_\phi \bar{I}_\phi(0) + \bar{U}_n(p), \\ \bar{U}_n(p) &= \frac{\bar{U}'_\kappa(0)}{p} + \frac{\bar{I}'_\kappa(p)}{C_\kappa p} + R_\kappa \bar{I}'_\kappa(p) \end{aligned} \right\}, \quad (2.9)$$

де $\bar{I}_\phi(0)$ - початкове значення узагальненого вектора мережевого струму; $\bar{U}'_\kappa(p)$ і $\bar{I}'_\kappa(p)$ - операторне зображення узагальнених векторів відповідно напруги на конденсаторах С4 - С6 і струму, що протікає через них; $\bar{U}_\phi(p)$ і $\bar{I}_\phi(p)$ - операторне зображення узагальнених векторів мережевих напруг і струму відповідно; $\bar{U}_n(p)$ - операторне зображення узагальненого вектора вхідної напруги АВС.

Відмітимо, що початкові значення (при $\tau' = 0$) згаданих узагальнених векторів статорних струму і напруги, а також напруги на конденсаторах С4 - С6 розраховуються через їх відповідні фазні значення:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_\phi(0) &= \frac{2}{3} [i_{\phi a}(0) + (\bar{a}) \cdot i_{\phi b}(0) + (\bar{a})^2 \cdot i_{\phi c}(0)], \\ \bar{U}_\phi(0) &= \frac{2}{3} [u_{\phi a}(0) + (\bar{a}) \cdot u_{\phi b}(0) + (\bar{a})^2 \cdot u_{\phi c}(0)], \\ \bar{U}'_\kappa &= \frac{2}{3} [u'_{\kappa a}(0) + (\bar{a}) \cdot u_{\kappa b}(0) + (\bar{a})^2 \cdot u_{\kappa c}(0)] \end{aligned} \right\}, \quad (2.10)$$

де $u_{\phi a}(0)$, $u_{\phi b}(0)$, $u_{\phi c}(0)$ і $i_{\phi a}(0)$, $i_{\phi b}(0)$, $i_{\phi c}(0)$ - початкові (при $\tau' = 0$) мережеві фазні напруги і струми відповідно; $u'_{\kappa a}(0)$, $u'_{\kappa b}(0)$ і $u'_{\kappa c}(0)$ - початкові (при $\tau' = 0$) фазні напруги на конденсаторах С4 - С6.

Приведемо розглянуту систему (2.9) до системи з двох рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_n(p) &= L_\phi \bar{I}_\phi(0) + \frac{\bar{U}_\phi(0)}{p - j\omega_\phi} - R_\phi \bar{I}_\phi(p) - pL_\phi \bar{I}_\phi(p), \\ \bar{U}_n(p) &= R_\kappa \left[\bar{I}_\phi(p) - \frac{\bar{I}_n(0)}{p} \right] + \frac{1}{C_\kappa p} \left[\bar{I}_\phi(p) - \frac{\bar{I}_n(0)}{p} \right] + \frac{\bar{U}'_\kappa(0)}{p} \end{aligned} \right\}. \quad (2.11)$$

Прирівнявши між собою праві частини першого і другого рівнянь системи (2.11), визначимо з отриманого виразу узагальнений вектор струму мережі в операційному вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{I}_\phi(p) &= \left[\frac{p}{p^2 L_\phi + p(R_\phi + R_\kappa) + 1/C_\kappa} \right] \times \\ &\times \left[\frac{\bar{I}_n(0)}{p} \left(R_\kappa + \frac{1}{C_\kappa p} \right) - \frac{\bar{U}'_\kappa(0)}{p} + L_\phi \bar{I}_\phi(0) + \frac{\bar{U}_\phi(0)}{p - j\omega_\phi} \right]. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Здійснивши перехід від операційного виду рівняння (2.12) до його часового оригіналу, отримаємо вираз, що описує поточне значення узагальненого вектора струму мережі $\bar{I}_\phi(\tau')$ на довільному міжкомутаційному інтервалі АВС:

$$\bar{I}_\phi(\tau') = \bar{I}_{1\phi}(\tau') + \bar{I}_{2\phi}(\tau') + \bar{I}_{3\phi}(\tau') + \bar{I}_{4\phi}(\tau'), \quad (2.13)$$

в якому складові $\bar{I}_{1\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{2\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{3\phi}(\tau')$ і $\bar{I}_{4\phi}(\tau')$ розраховуються з співвідношень:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{1\phi}(\tau') = \bar{I}_n(0) & \left\{ 1 + \frac{j e^{-\tau'/2T_\phi}}{4T_\phi\omega'_0} \left[e^{j\omega'_0\tau'} \left(1 + j2T_\phi\omega'_0 - \frac{2T_\phi R_\kappa}{L_\phi} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - e^{-j\omega'_0\tau'} \left(1 - j2T_\phi\omega'_0 - \frac{2T_\phi R_\kappa}{L_\phi} \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\bar{I}_{2\phi}(\tau') = \bar{I}_\phi(0) \frac{j e^{-\tau'/2T_\phi}}{4T_\phi\omega'_0} \left[e^{j\omega'_0\tau'} (1 - j2T_\phi\omega'_0) - e^{-j\omega'_0\tau'} (1 + j2T_\phi\omega'_0) \right], \quad (2.15)$$

$$\bar{I}_{3\phi}(\tau') = j\bar{U}'_\kappa(0) e^{-\tau'/2T_\phi} \cdot \frac{e^{j\omega'_0\tau'} - e^{-j\omega'_0\tau'}}{2L_\phi\omega'_0}, \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{4\phi}(\tau') = \bar{U}_\phi(0) & \left\{ \frac{1}{4L_\phi\omega'_0(j(1 - L_\phi C_\kappa\omega_\phi^2) - R'_\Sigma C_\kappa\omega_\phi)} \times \right. \\ & \times \left[e^{-\tau'(1/2T_\phi + j\omega'_0)} \cdot (e^{j2\omega'_0\tau'} (2L_\phi C_\kappa\omega'_0\omega_\phi + 2 + jR'_\Sigma C_\kappa\omega_\phi) + \right. \\ & \left. \left. + 2L_\phi C_\kappa\omega'_0\omega_\phi - 2 - jR'_\Sigma C_\kappa\omega_\phi) - 4e^{j2\omega_\phi\tau'} L_\phi C_\kappa\omega'_0\omega_\phi \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

У співвідношеннях (2.14) - (2.17) власна частота коливань ω'_0 , електромагнітна постійна часу T_ϕ і сумарний активний опір R'_Σ знаходяться з залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \omega'_0 &= \sqrt{\frac{1}{L_\phi C_\kappa} - \frac{1}{4T_\phi^2}}, \\ T_\phi &= L_\phi / R'_\Sigma, \\ R'_\Sigma &= R_\phi + R_\kappa \end{aligned} \right\}. \quad (2.18)$$

З отриманих співвідношень (2.12) - (2.16) проведені розрахунки узагальнених векторів струму мережі $\bar{I}_\phi(\tau')$ і його складових $\bar{I}_{1\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{2\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{3\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{4\phi}(\tau')$ через проєкції цих векторів на дійсну " α " та уявну " β " осі нерухомої ОКС " $\alpha - \beta$ " (пов'язаної дійсною віссю з геометричною віссю обмотки фази силового трансформатора) для довільного міжкомутаційного інтервалу ABC.

Згідно з розрахунком, здійсненому для стаціонарного режиму роботи розглянутого АЕП (при номінальних значеннях швидкості і навантаження двигуна) на міжкомутаційному інтервалі $(0, \tau'_k)$ тривалістю 200 мкс, побудовані годографи руху розрахованих узагальнених векторів струму мережі $\bar{I}_\phi(\tau')$ і його складових $\bar{I}_{1\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{2\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{3\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{4\phi}(\tau')$, які показані на рис. 2.3.

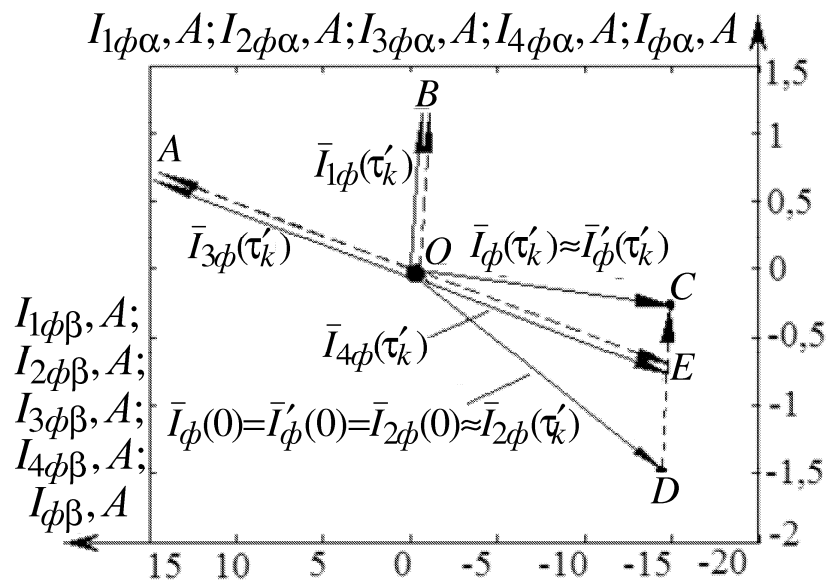


Рисунок 2.3. - Годографи руху узагальнених векторів струму $\bar{I}_{1\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{2\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{3\phi}(\tau')$, $\bar{I}_{4\phi}(\tau')$, $\bar{I}_\phi(\tau')$ і $\bar{I}'_\phi(\tau')$

Слід зазначити, що напрямок зміни збільшення $\Delta\bar{I}_\phi(\tau') = \bar{I}_\phi(\tau') - \bar{I}_\phi(0)$ узагальненого вектора струму мережі $\bar{I}_\phi(\tau')$ визначається лише його першою складовою $\bar{I}_{1\phi}(\tau')$, яка залежить від узагальненого вектора вхідного струму $\bar{I}_n(0)$ активного випрямляча. Це дозволяє запропонувати новий спосіб прогнозування

напрямку збільшення $\Delta \bar{I}_\phi(\tau')$ узагальненого вектора мережевого струму $\bar{I}_\phi(\tau')$ на поточному міжкомутаційному інтервалі, а саме - по напряму поточного узагальненого вектора вхідного струму АВС.

2.2 Прогнозне управління активним випрямлячем струму

З урахуванням запропонованого способу прогнозування (на довільному міжкомутаційному інтервалі АВС) напряму збільшення $\Delta \bar{I}_\phi(\tau')$ узагальненого вектора струму мережі $\bar{I}_\phi(\tau')$ розроблена векторна система регулювання струму випрямляча (СРСВ), що служить для векторного регулювання струму мережі АВС і показана на рис. 2.4. Дана система регулювання містить: перетворювачі фаз ПФ4, ПФ5 і ПФ6; координатний перетворювач КП4; обчислювачі гармонічних функцій ОГФ6, ОГФ7 і ОГФ8; компаратор К3; регістр Р2; обчислювач прогнозного функціоналу ОПФ3; обчислювач екстремального значення ОЕ32; обчислювач фазних струмів випрямляча ОФСВ; суматори S1 і S2.

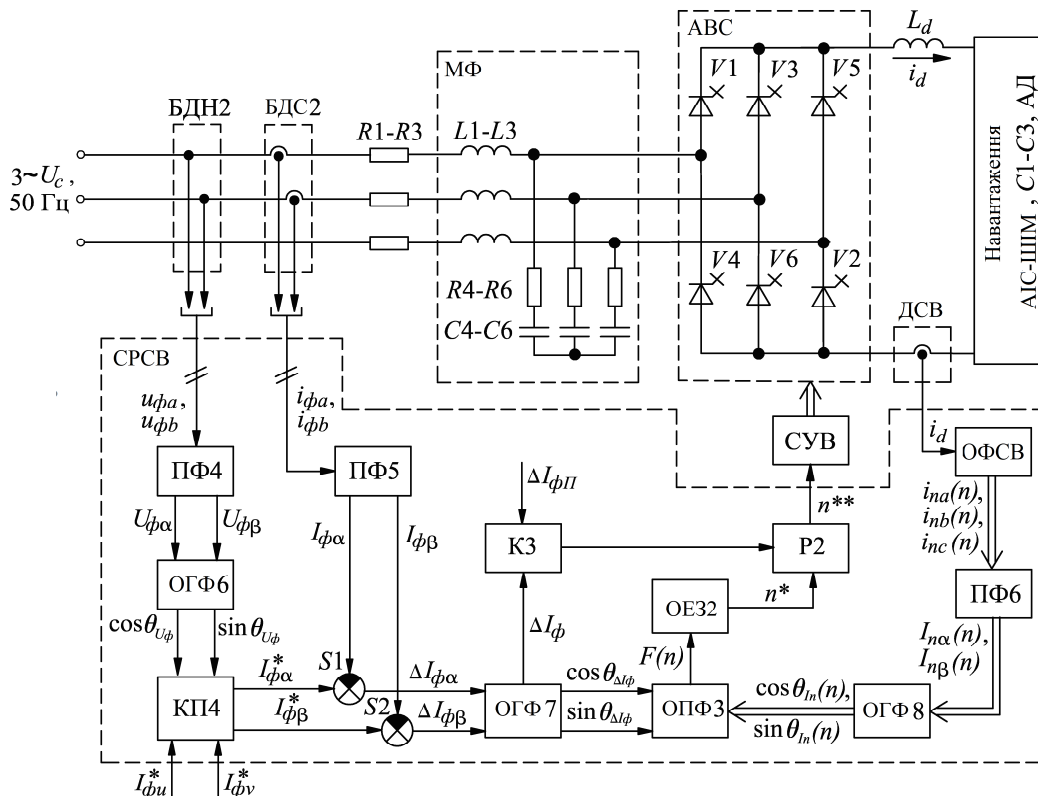


Рисунок 2.4. - Функціональна схема системи прогнозного релейно-векторного регулювання мережевого струму

В системі СРСВ реалізований розроблений спосіб прогнозування АВС. В розглянутій системі СРСВ на рис.2.4 реалізується запропоноване прогноуюче управління АВС, при якому з усіх можливих робочих комбінацій станів силових ключів випрямляча задається така їх комбінація n^* , яка забезпечує виконання співвідношення:

$$|\theta_{\Delta I\phi} - \theta_{I_n}(n)| = \min, \quad (2.19)$$

яка характеризує найкраще збіг між собою у напрямку узагальнених векторів відхилення струму $\Delta \bar{I}_\phi$ і вхідного струму \bar{I}_n випрямляча.

Приймаючи до уваги мале значення уставки $\Delta I_{\phi\Pi}$ (що становить 3 - 5% від амплітуди номінального статорного струму АД) за допомогою розглянутої системи СРСВ, що впливає на силові ключі АВС, формуються в сталому режимі роботи (при $\bar{I}_\phi^* = \text{const}$) близькі за формою до синусоїдальної мережеві фазні струми:

$$\left. \begin{aligned} i_{\phi a} &\approx i_{\phi a}^* = I_\phi^* \cos\theta_{U\phi}, \\ i_{\phi b} &\approx i_{\phi b}^* = I_\phi^* \cos(\theta_{U\phi} - 2\pi/3), \\ i_{\phi c} &\approx i_{\phi c}^* = I_\phi^* \cos(\theta_{U\phi} + 2\pi/3) \end{aligned} \right\}, \quad (2.20)$$

де $\theta_{U\phi}$ і I_ϕ^* - відповідно аргумент узагальненого вектора мережевої напруги \bar{U}_ϕ і задане значення модуля узагальненого вектора струму мережі, у вигляді:

$$I_\phi^* = \sqrt{(I_{\phi u}^*)^2 + (I_{\phi v}^*)^2}. \quad (2.21)$$

Прогнозуючому векторному управлінню АВС притаманні такі переваги в порівнянні з відомими способами релейно-векторного управління АВС:

- програмне і технічне спрощення;
- не критичність запропонованого способу до відходу параметрів елементів силової схеми АЕП (на відміну від відомого способу, в якому необхідне коректування параметрів прогнозного функціоналу при дрейфі в експлуатації активних опорів R1- R3 і ємності С4-С6 конденсаторів МФ).

2.3. Розробка системи автоматичного керування асинхронним електроприводом з АІС-ШІМ, оснащеним АВС

Розроблена на основі запропонованого прогнозного управління система автоматичного управління САУЗ швидкістю і положенням для АЕП з АІС-ШІМ, забезпеченого АВС, показана на рис. 2.5. Дана система [12] містить в своєму складі: обчислювачі модуля ОМ1 і ОМ5; системи регулювання струму випрямляча СРСВ і струму двигуна СРСД, які служать відповідно для управління АВС і АІС-ШІМ; регулятори випрямленого струму РВС, поточозчеплення РПЗ, положення РП і швидкості РШ двигуна; блок ідентифікації БІ; мнофельно-ділильний блок МДБ; системи управління випрямлячем СУВ і інвертором СУІ; датчик вхідної напруги ДН інвертора; датчик випрямленого струму ДВС; датчик положення вала ротора двигуна ДП; блоки датчиків напруги БДН1, БДН2 і струму БДС1, БДС2; перемикач SA; суматори S1-S5.

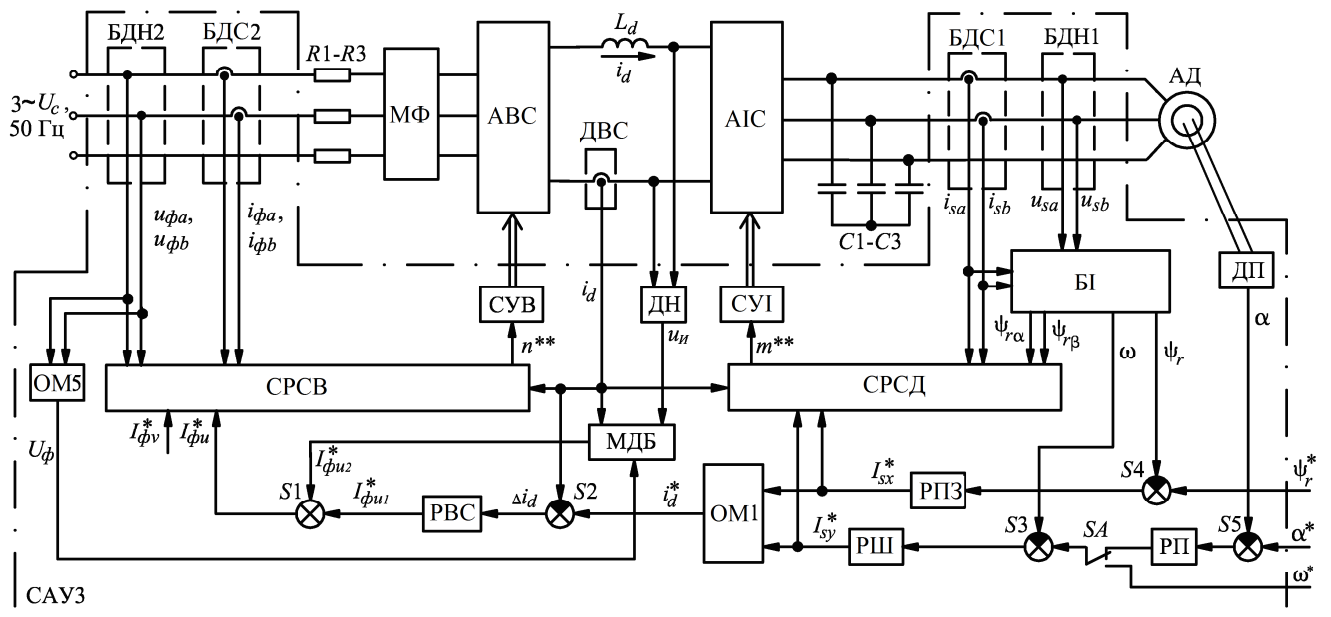


Рисунок 2.5. - Функціональна схема автоматичного керування асинхронним електроприводом з АІС-ШІМ, забезпеченим АВС

Представлена на рис. 2.5 САУЗ виконана з однозонним регулюванням швидкості відповідно до принципів підлеглого регулювання. В розглядаємій схемі перемикачем SA здійснюється вибір виду структури використовуємої в АЕП

системи автоматичного управління: якщо замкнутий верхній контакт перемикача SA, то реалізується САУ положенням, в якій сигнал завдання на швидкість ω^* обчислюється на виході регулятора положення РП (відповідно до поступаючих на вхід цього регулятора сигналом відхилення $\Delta\alpha$ між заданим α^* і фактичним значеннями положення α вала ротора двигуна). Якщо замкнутий нижній контакт перемикача SA, то в схемі на рис. 2.5 реалізується САУ швидкості, в якій сигнал завдання швидкості ω^* формується зовнішнім командним (задаючим) пристроєм.

За заданим значенням швидкості ω^* і потокозчеплення ротора Ψ_r^* двигуна формуються за допомогою регуляторів швидкості РС і потякозчеплення РПС сигнали завдання відповідно активної I_{sy}^* і намагнічуючої I_{sx}^* проєкцій узагальненого вектора статорного струму АД на осі абсцис "x" і ординат "y" - обертової ОКС "x - y" (орієнтованої віссю "x" за узагальненим вектором потокозчеплення ротора асинхронного двигуна). За цими сигналами завдання системою регулювання СРСД обчислюється чергова комбінація m^{**} відкритих і закритих тиристорів АІС, відповідно до якої системою СУІ формуються імпульси управління силовими ключами інвертора. Через згадані задані значення намагнічуючої I_{sx}^* і активної I_{sy}^* проєкцій вектора статорного струму на виході обчислювача ВМ1 розраховується сигнал завдання на вихідний струм випрямляча для регулятора РВС [30].

За допомогою сумматора S1 задане значення активної проєкції $I_{\phi u}^*$ вектора струму мережі на вісь абсцис ОКС обчислюється у вигляді суми двох доданків з наступного співвідношення:

$$I_{\phi u}^* = I_{\phi u1}^* + I_{\phi u2}^* \quad (2.22)$$

Причому перший доданок $I_{\phi u1}^*$ з даного виразу задається з виходу регулятором РВС, а другий $I_{\phi u2}^*$ - обчислюється блоком МДБ із залежності:

$$I_{\phi u2}^* = \frac{2}{3U_{\phi}} u_{II} i_d \quad (2.23)$$

При цьому остання залежність отримана, виходячи з спрощеного виразу для балансу активних потужностей на вході і виході активного випрямляча:

$$\frac{3}{2}U_{\phi}I_{\phi u2} \approx u_{II}i_d, \quad (2.24)$$

де u_{II} - вхідна напруга АІС, контрольована датчиком ДН; U_{ϕ} - модуль узагальненого вектора напруги; $I_{\phi u2}$ - складова проекції узагальненого вектора струму мережі на вісь абсцис ОКС.

Вказане значення модуля узагальненого вектора напруги розраховується за двома (контрольним блоком датчиків БДН2) фазними мережевими напругами в обчислювачі ВМ5 із залежності:

$$U_{\phi} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot (u_{\phi a}^2 + u_{\phi a}u_{\phi b} + u_{\phi b}^2)}. \quad (2.25)$$

У системі управління САУЗ, показаної на рис. 2.5, для регулятора швидкості застосовувалася настройка: на симетричний оптимум - при регулюванні швидкості або на модульний оптимум - при регулюванні положення; регулятору положення в позиційному електроприводі відповідала настройка: на критичне демпфування - при малих переміщеннях або параболічна передавальна характеристика - при середніх і великих переміщеннях, а в стежачому електроприводі використовувалася настройка на симетричний оптимум; для регулятора потягосцеплення застосовувалася настройка на модульний оптимум.

2.4. Електромагнітні і електромеханічні процеси в асинхронному електроприводі з АІС-ШІМ, оснащеним активним випрямлячем струму

Дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеним АВС з використанням запропонованої системи управління САУЗ (показана на рис .2.5), проводилося на створеній імітаційній моделі даного електроприводу (наведеної в розділі 1), яка враховує фактичну дискретність роботи силових ключів АВС і АІС. За допомогою даної імітаційної моделі АЕП були розраховані (для двох значень індуктивності згладжувачого дроселя L_d ,

рівних 0,075 Гн і 0,03 Гн) стаціонарні і перехідні електромагнітні та електро-ромеханічні процеси в різних робочих режимах функціонування електроприводу, а також проведена кількісна оцінка досягаємої швидкодії в цьому електроприводі.

Зокрема, на рис.2.6 і рис.2.7 показані стаціонарні електромагнітні процеси АЕП з АІС-ШІМ, розраховані відповідно при рівних номінальному позитивному і негативному значеннях моменту навантаження АД при різних швидкостях роботи двигуна: $\omega = 0,1 \omega_n$; $\omega = 0,5 \omega_n$ і $\omega = \omega_n$. На цих же швидкостях також розраховані і показані на рис. 2.8 і рис. 2.9 перехідні електромеханічні процеси АЕП при відпрацюванні поступово змінюваного двократного (від номінального значення) завдання (різної полярності) на активну проекцію I_{sy} узагальненого вектора статорного струму двигуна.

На рис. 2.10 і рис. 2.11 показані перехідні електромеханічні процеси АЕП з АІС- ШІМ, оснащеного АВС, для наступних режимів його роботи: розгону до номінальної швидкості двигуна, збільшення позитивного і негативного номінальних моментів навантаження, скидання навантаження, реверсу АД до половинної від номінального значення швидкості і гальмування до нульової швидкості.

На рис. 2.12 представлені перехідні електромеханічні процеси регулювання положення для АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, при відпрацюванні більших позиційних переміщень або лінійно-наростаючого сигналу завдання положення вала ротора АД з подальшим набросом (в момент часу $t = 0,15c$) номінального моменту навантаження.

На рис. 2.6 - рис. 2.12 прийняті наступні позначення: u_{sa} , i_{sa} і ψ_{ra} - фазні значення статорних напруги і струму, потокозчеплення ротора; $i_{\phi a}$ і i_d - фазні значення струму мережі і вихідний струм випрямляча відповідно; M і ω - електромагнітний момент і кутова швидкість АД; I_s і Ψ_r - відповідно модулі узагальнених векторів статорного струму і потокозчеплення ротора; α^* і α - задане і фактичне значення кута повороту вала АД.

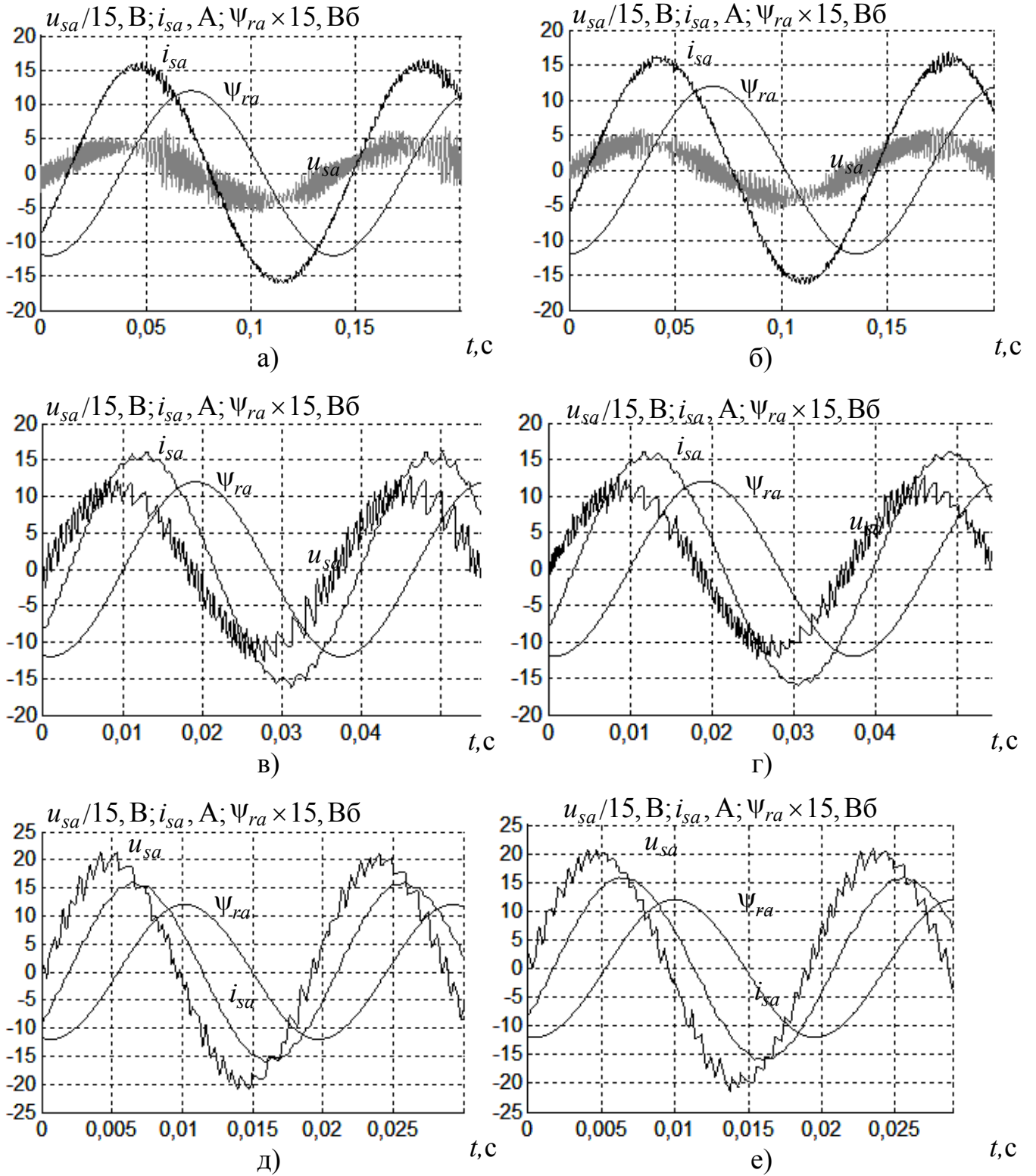


Рисунок 2.6. - Стационарні електромагнітні процеси для АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, при номінальному позитивному моменті навантаження: для $L_d=0,075$ Гн; б, г, е – для $L_d=0,03$ Гн (при швидкостях: а, б – для $\omega=0,1\omega_n$; в, г – для $\omega=0,5\omega_n$; д, е – для $\omega=\omega_n$)

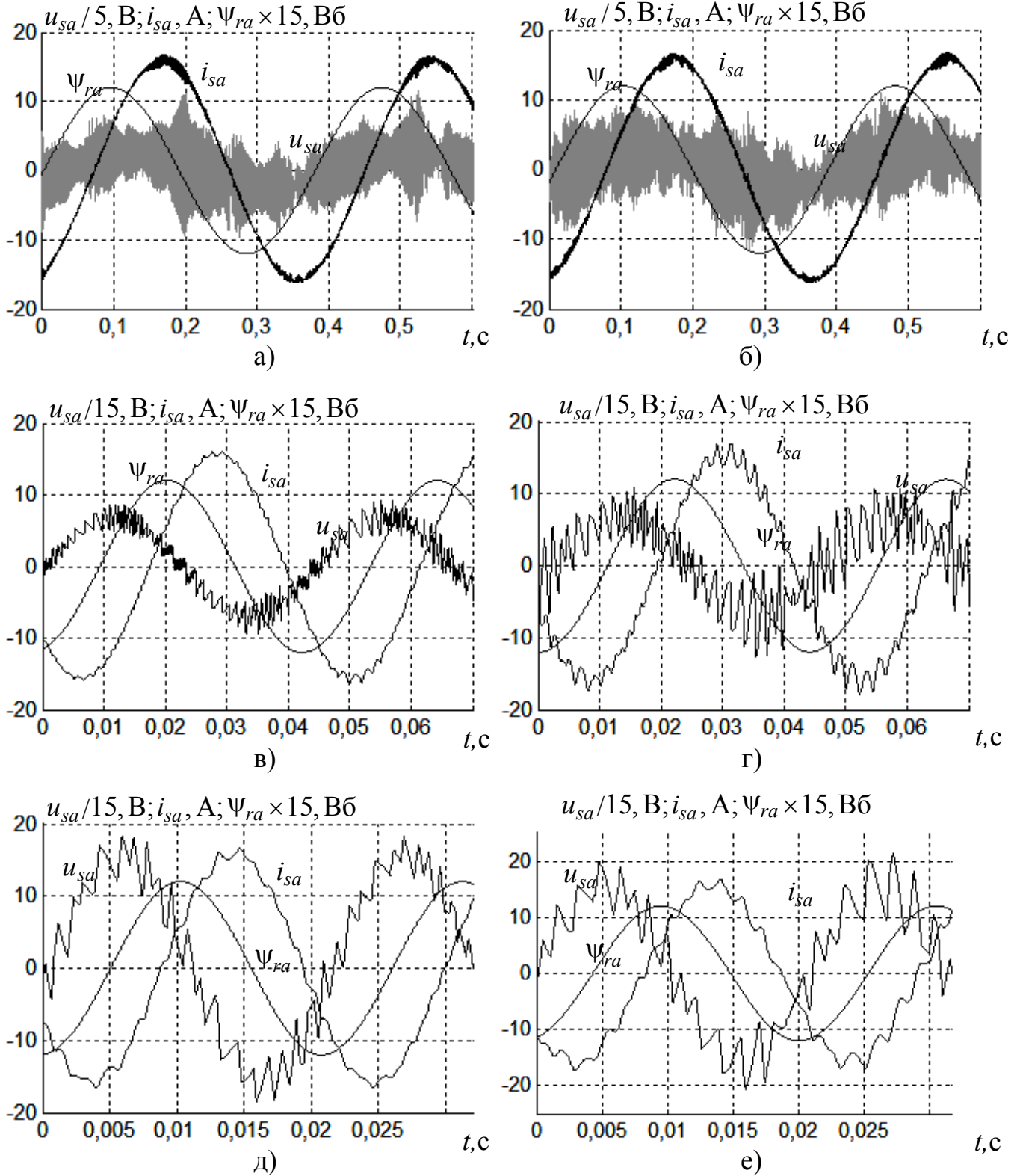


Рисунок 2.7. - Стационарні електромагнітні процеси для АЕП з АІС-ШИМ, оснащеного АВС, при номінальному негативному моменті навантаження: а, в, д – для $L_d=0,075 \text{ Гн}$; б, г, е – для $L_d=0,03 \text{ Гн}$ (при швидкостях: а, б – для $\omega=0,1 \omega_n$; в, г – для $\omega=0,5 \omega_n$; д, е – для $\omega=\omega_n$)

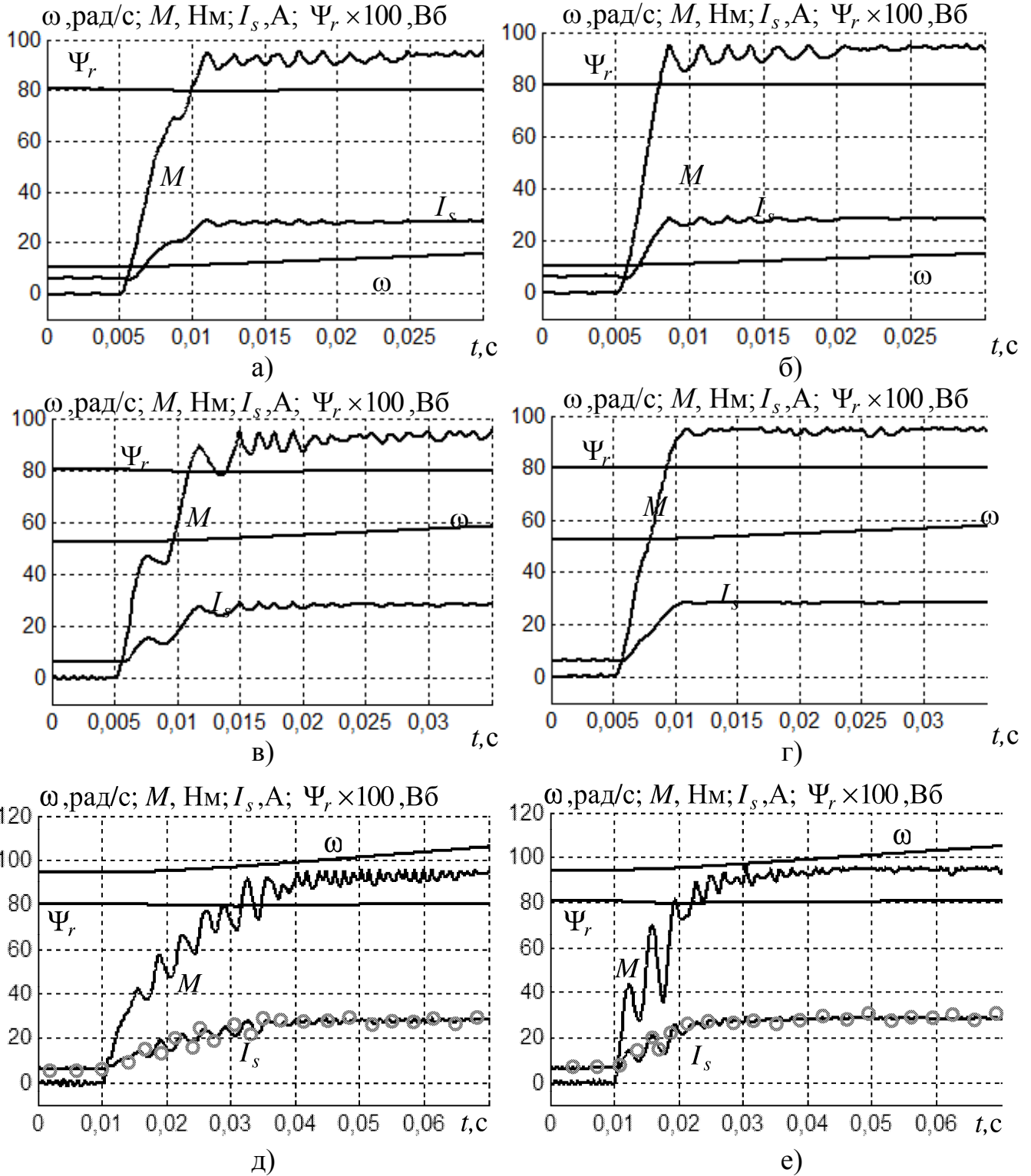


Рисунок 2.8. - Електро механічні процеси відпрацювання ступінчато змінюваного дворазового (від номінального значення) завдання на активну складову статорного струму (позитивної полярності) в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС:

а, в, д – для $L_d = 0,075$ Гн; б, г, е – для $L_d = 0,03$ Гн (при швидкостях: а, б – для $\omega = 0,1 \omega_n$; в, г – для $\omega = 0,5 \omega_n$; д, е – для $\omega = 0,9 \omega_n$)

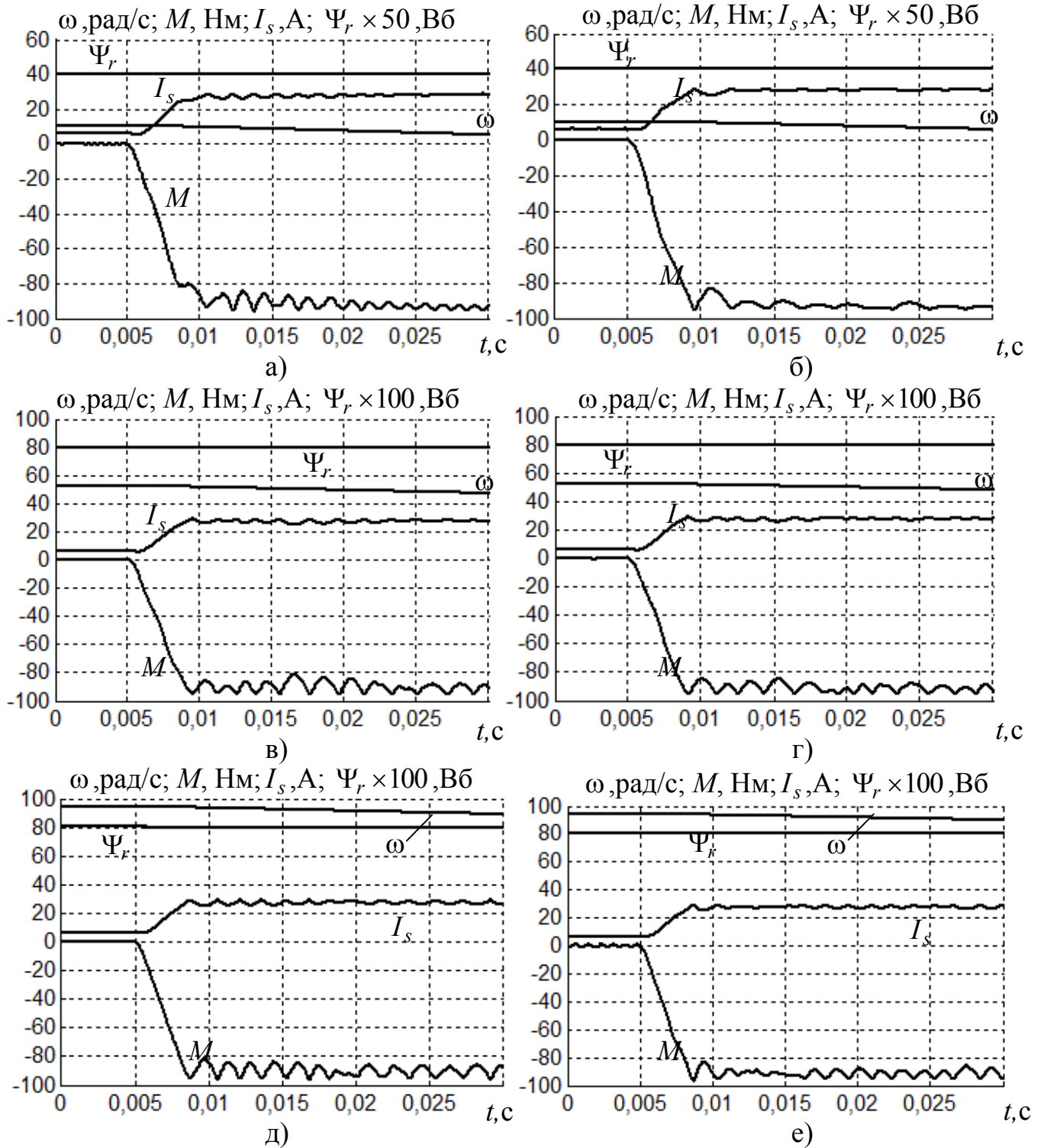


Рисунок 2.9. - Електромеханічні процеси відпрацювання поступово змінюваного дворазового (від номінального значення) завдання на активну складову статорного струму (негативної полярності) в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС:

а, в, д – для $L_d = 0,075$ Гн; б, г, е – для $L_d = 0,03$ Гн (при швидкостях: а, б – для $\omega = 0,1 \omega_n$; в, г – для $\omega = 0,5 \omega_n$; д, е – для $\omega = 0,9 \omega_n$)

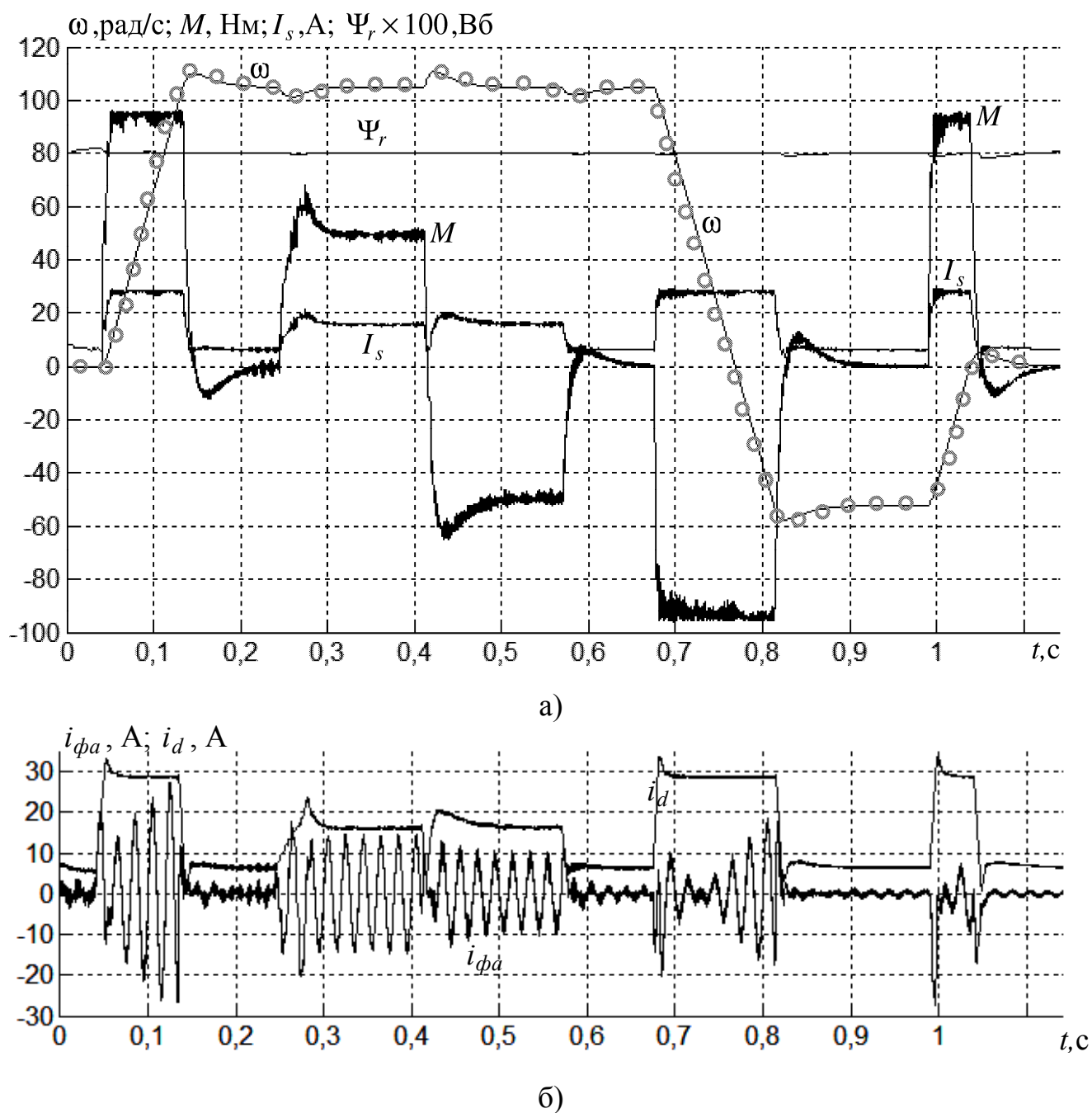
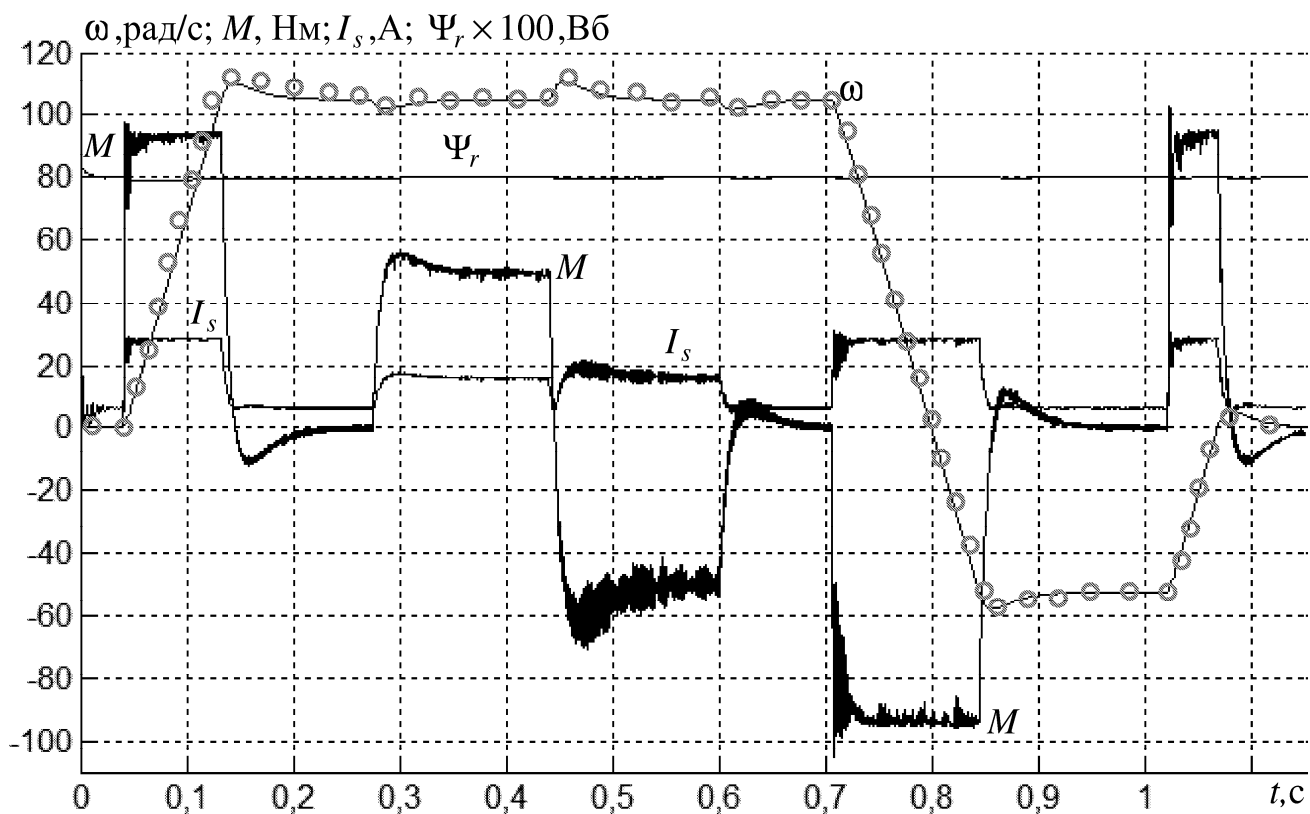
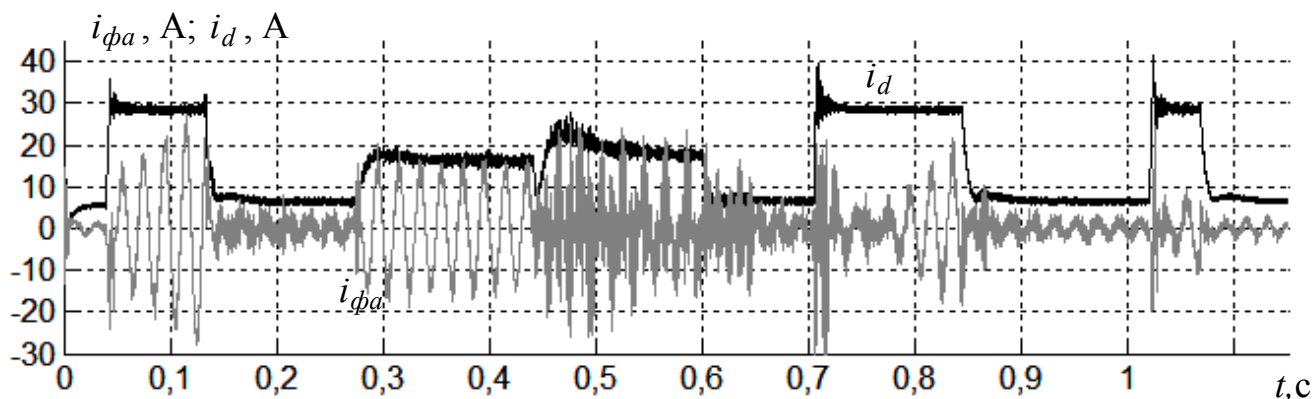


Рисунок 2.10. - Електромеханічні процеси двигуна (а), процеси зміни мережевого фазного струму і вихідного струму випрямляча (б) в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, для режимів розгону, накиду і скидання номінального навантаження, реверса і гальмування до повної зупинки (при $L_d=0,075Гн$),



а)



б)

Рисунок 2.11. - Електромеханічні процеси двигуна (а), процеси зміни мережевого фазного струму і вихідного струму випрямляча (б) в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, для режимів розгону, накинув і скидання номінального навантаження, ревер-са і гальмування до повної зупинки (при $L_d = 0,03$ Гн),

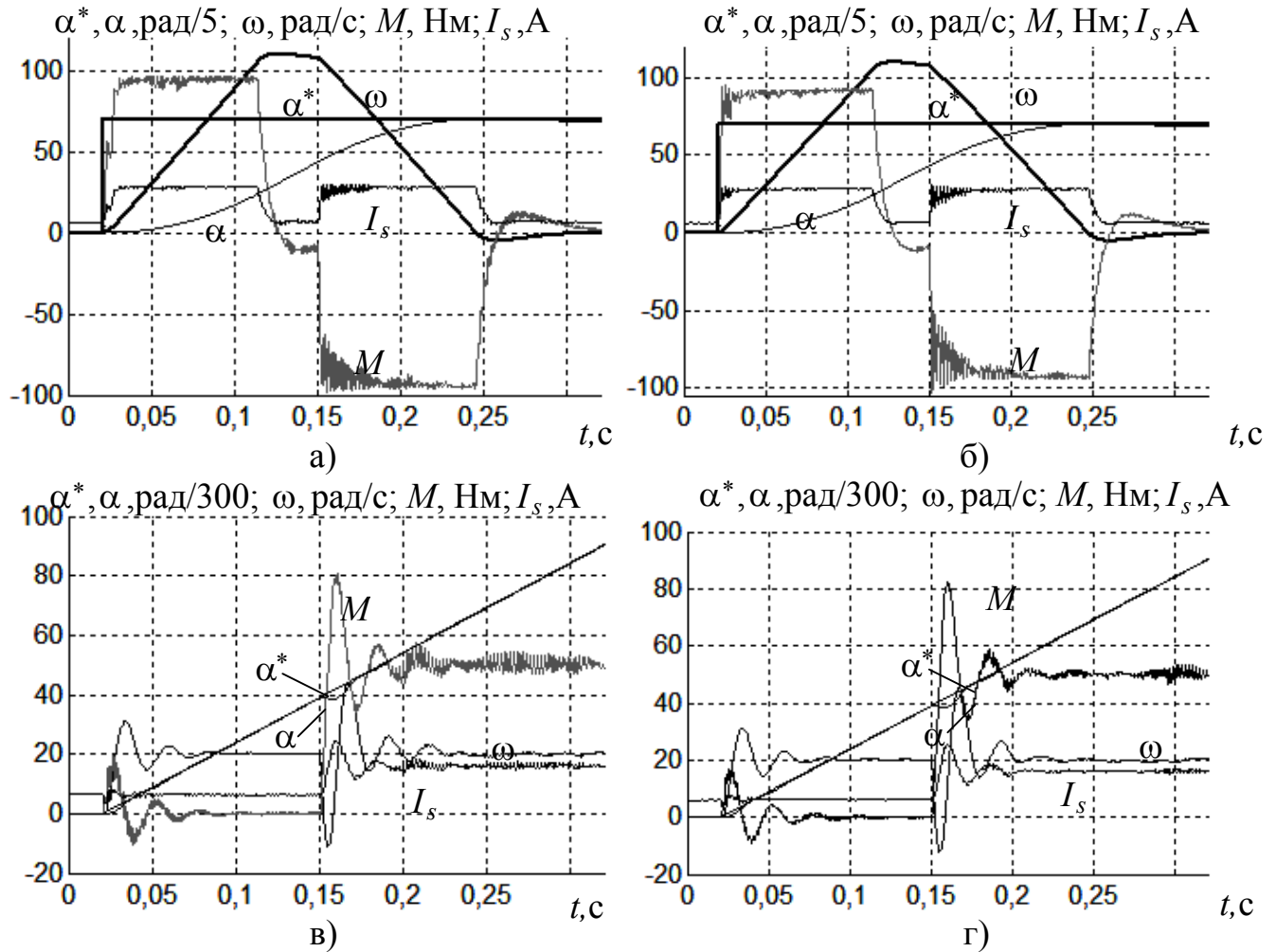


Рисунок 2.12. - Електромеханічні процеси для АЕП з АІС-ШІМ при регулюванні положення і відпрацювання: а, б - великих переміщень; в, г - лінійно-наростаючого сигналу завдання (а, в – при $L_d=0,075$ Гн; б, г – при $L_d=0,03$ Гн)

Аналіз результатів дослідження електромеханічних процесів в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, дозволяє відзначити такі особливості запропонованого управління:

1) зменшення (з 18 до 3%) значень перерегулювання по струму при відпрацюванні дворазового (від номінального) значення вихідного струму АВС, що виникають при збуреннях по вхідній напрузі інвертора (що виникають в досліджуваному АЕП при змінах електромагнітного моменту і швидкості двигуна), що досягається шляхом введення на вхід суматора S1 в функціональній схемі САУЗ на рис.2.5 компенсуючого сигналу з виходу блоку МДБ;

2) нормована якість регулювання електромеханічних процесів (статорного струму, потокозчеплення ротора, швидкості і положення вала ротора АД) в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС;

3) запропоноване управління для АЕП з АІС, оснащеного АВС, дозволяє при зменшенні (до 2,5 разів) індуктивності згладжуючого дроселя зберегти працездатність цього електроприводу і підтримати високу якість регулювання його електромеханічних процесів.

Для запропонованого автоматичного управління на імітаційній моделі АЕП з АІС-ШІМ виконаний розрахунок відношення амплітуд фактичного та заданого (у вигляді гармонійного сигналу з частотою f) значень швидкості від згаданої частоти, за результатами якого побудовані графіки на рис. 2.13. При цьому визначена смуга пропускання по швидкості у вигляді граничного значення частоти f , при якій відношення амплітуд перевищує значення $1/\sqrt{2}$. Проведеними дослідженнями встановлено, що для індуктивності згладжуючого дроселя, що дорівнює 0,075 Гн, смуга пропускання становить 28 Гц при швидкості $\omega = 0$ або 31 Гц при швидкості $\omega = 0,9\omega_n$, а для індуктивності дроселя L_d , що дорівнює 0,03 Гн - становить 54 Гц при швидкості $\omega = 0$ або 60 Гц при швидкості $\omega = 0,9\omega_n$. Таким чином, при зменшеному в 2,5 разі значенні індуктивності згладжуючого дроселя ($L_d = 0,03$ Гн) смуга пропускання зростає більш, ніж в 1,9 раза.

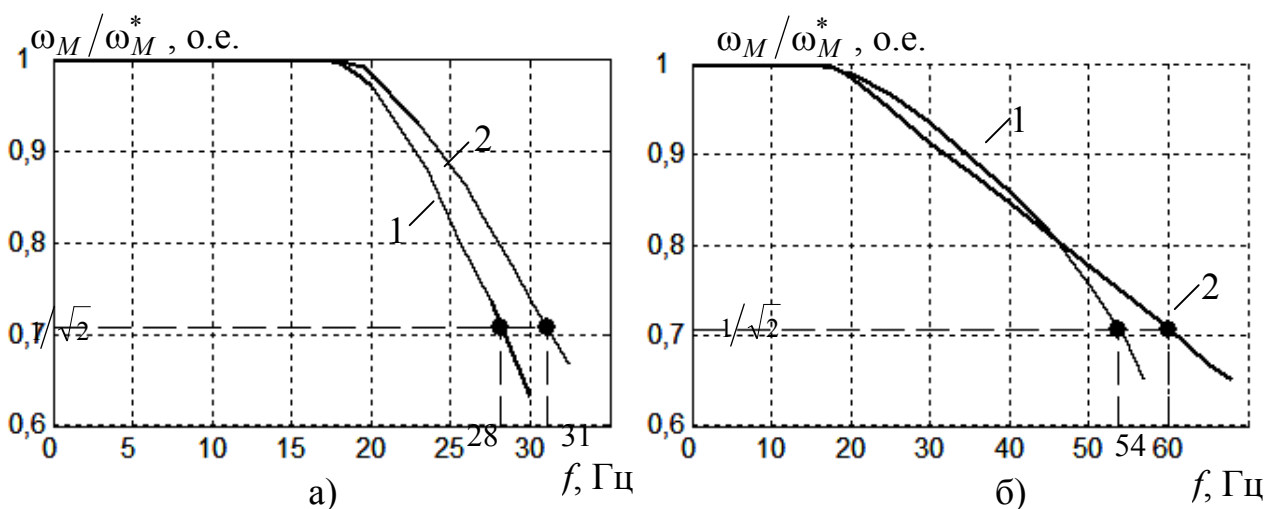


Рисунок 2.13. - Дослідження смуги пропускання АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС: а – для $L_d=0,075$ Гн; б – для $L_d=0,03$ Гн (1 – при $\omega = 0,9\omega_n$; 2 – при $\omega = 0$)

В табл. 2.1 наведені результати розрахунків часу відпрацювання східчасто змінного дворазового (від номінального значення) завдання (різної полярності) на активну проекцію узагальненого вектора статорного струму двигуна. Отримані результати дозволяють оцінити швидкодію при відпрацюванні активної проекції вектора статорного струму при спільній роботі розроблених прогнозних систем релейно-векторного регулювання статорного струму СРСД і струму випрямляча СРСВ, показаної на рис. 2.4.

Таблиця 2.1. - Значення часу відпрацювання поступово змінюваного дворазового (від номінального значення) завдання на активну проекцію вектора статорного струму

ω , рад/с	Полярність I_{sy}^*	Значення часу відпрацювання проекції I_{sy}^* , мс	
		при $L_d=0,075\text{Гн}$	при $L_d=0,03\text{Гн}$
$\omega=0,9\omega_n$	+	30	17
	-	3,5	3,5
$\omega=0,5\omega_n$	+	10	6
	-	4,7	4,5
$\omega=0,1\omega_n$	+	6	3,5
	-	5,5	4,5

З аналізу табл. 2.1 можна зробити наступні висновки:

1) для АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС (при $L_d = 0,075$ Гн), в широкому діапазоні зміни швидкості двигуна забезпечується швидкодія відпрацювання статорного струму АД практично ідентичним, досягнутому в АЕП з АІС-ШІМ;

2) зниження індуктивності згладжуючого дроселя в 2,5 рази (від 0,075 Гн до значення $L_d = 0,03$ Гн) дозволяє збільшити (більш, ніж в 1,7 рази) швидкодію відпрацювання заданого значення позитивної полярності активної складової вектора статорного струму двигуна в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС;

3) при номінальній швидкості двигуна в АЕП з АІС-ШІМ, з оснащеного АВС (при $L_d = 0,075$ Гн), час відпрацювання активної проекції вектора

статорного струму становить на 20% більше в порівнянні з часом відпрацювання, що досягається в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного тиристорним випрямлячем; це пояснюється тим, що в системі СРСВ при виборі комбінації стану силових ключів АВС перевага віддається тим комбінаціям, які забезпечують поліпшені мережеві енергетичні показники АЕП (мережевий коефіцієнт потужності і загальний коефіцієнт гармонійних спотворень в мережевому струмі), а не підвищену швидкодію при регулюванні вихідного струму АВС.

В даний час у всіх галузях промисловості переважна більшість споживачів електричної енергії генерує в мережу живлення реактивну потужність (в основому індуктивного характеру). Для компенсації реактивної потужності активно-індуктивного характеру (при якій мережеві фазні струми відстають по фазі від відповідних їм мережевих фазних напруг) необхідно, щоб АЕП з АІС-ШІМ, оснащений АВС, генерував в мережу живлення реактивну потужність ємнісного характеру (при якому мережеві фазні струми випереджають по фазі відповідні їм мережеві фазні напруги). Для АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, виконані розрахунки електромеханічних процесів, показаних на рис. 2.14, відпрацювання ступеневої зміни $I_{\phi v}^*$ на реактивну проекцію узагальненого вектора струму мережі і генерування в мережу живлення реактивної потужності активно-ємнісного характеру.

З проведених досліджень відпрацювання реактивної проекції вектора струму мережі в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, слідує:

- час відпрацювання поступово змінюваного завдання на реактивну проекцію вектора струму мережі від нульового значення до значення, рівного заданому значенням активної проекції того ж вектора, склало 1 мс, а від згаданого номінального значення активної проекції до нуля, - склало 0,8 мс;

- час відпрацювання реактивної проекції вектора струму мережі не залежить від поточної швидкості двигуна і характеру його моменту навантаження і залишається однаковим для двох значень індуктивності згладжуючого дроселя;

- при запропонованому автоматичному регулюванні АВС перехідний пропроцес відпрацювання східчасто змінюваного завдання на реактивну проекцію

вектора струму мережі не впливає на електромагнітні процеси, що протікають в двигуні.

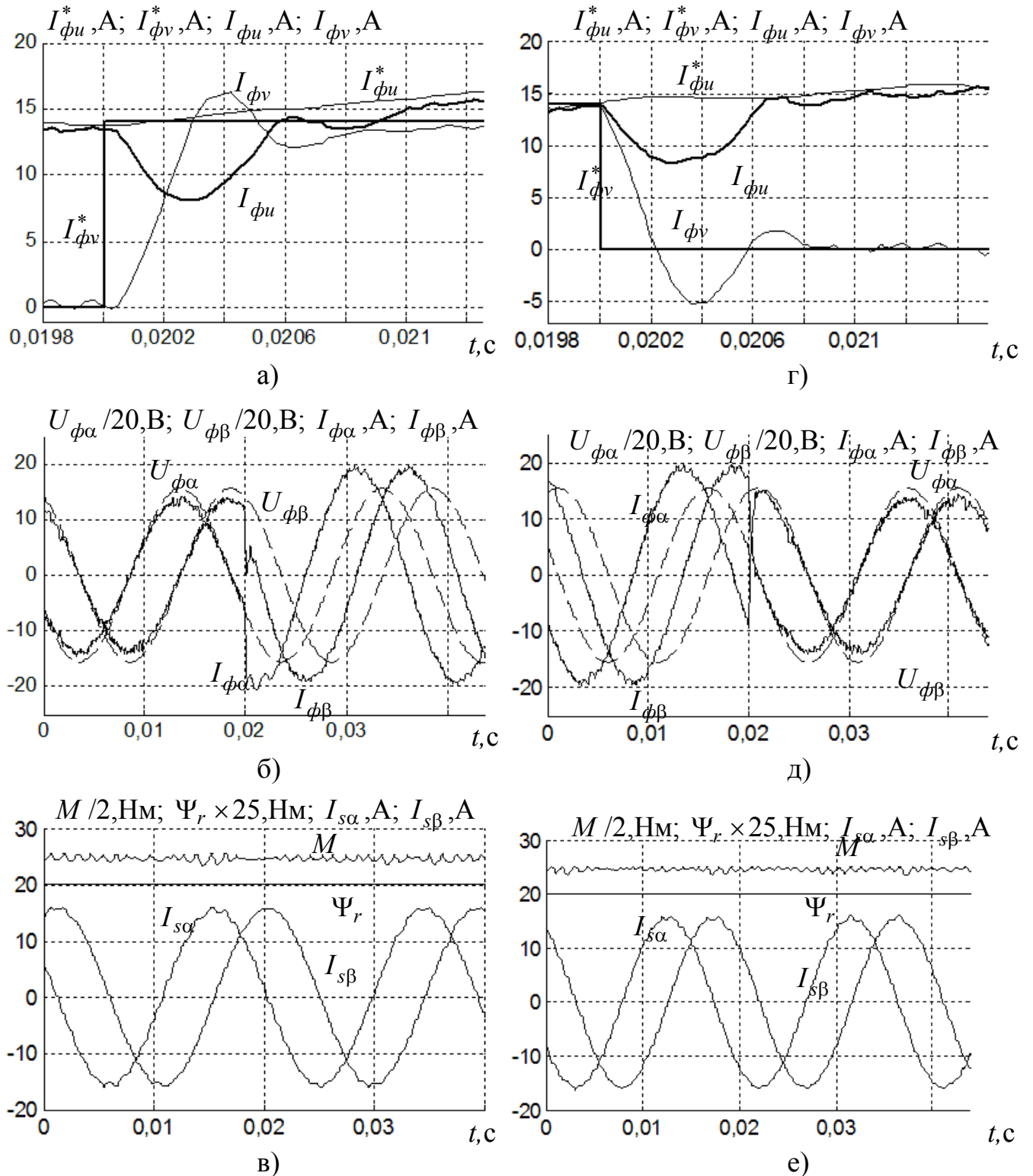


Рисунок 2.14. - Електромагнітні процеси при номінальному навантаженні і $L_d = 0,075$ Гн в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеному АВС, відповідні ступінчастою відпрацювання реактивної проекції вектора струму мережі ємнісного характеру (а, б, в – зміна $I_{\phi v}^*$ від нуля до $I_{\phi_{\text{фин}}}$; г, д, е – зміна $I_{\phi v}^*$ від $I_{\phi_{\text{фин}}}$ до нуля)

Таким чином АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, при запропонованому автоматичному регулюванні є ефективним і швидкодіючим компенсатором реактивної потужності в мережі живлення при збереженні низьких значень коефіцієнта гармонійних спотворень струму мережі. Зазначена компенсація реактивної потужності в мережі призначена для підвищення мережевого коефіцієнта потужності в вузлах розподілу електроенергії, що дозволяє знизити струмове завантаження силового електрообладнання підстанцій і кабельних ліній, а отже, - зменшити в них втрати потужності при передачі електроенергії споживачам.

2.5. Енергетичні показники для асинхронного електроприводу з АІС-ШІМ, оснащеного активним випрямлячем струму

Прі використанні згаданої в п. 2.4 імітаційної моделі АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, розраховані (для двох значень індуктивності згладжуючого дроселя L_d , рівних 0,075Гн і 0,03Гн) стаціонарні електромагнітні процеси та енергетичні показники розглянутого АЕП. Зокрема, для трьох значень швидкості ($0,1\omega_n$, $0,5\omega_n$ і ω_n) на рис.2.15 і рис.2.16 показані стаціонарні електромагнітні процеси, отримані в руховому і генераторному режимах функціонування для АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС. На рис.2.17 і рис.2.18 представлені розраховані спектри вищих гармонік (у відсотках від першої гармоніки). Встановлено, що найбільші за амплітудою вищі гармоніки в мережевих фазних струмах співпадають з частотою комутації силових ключів випрямляча.

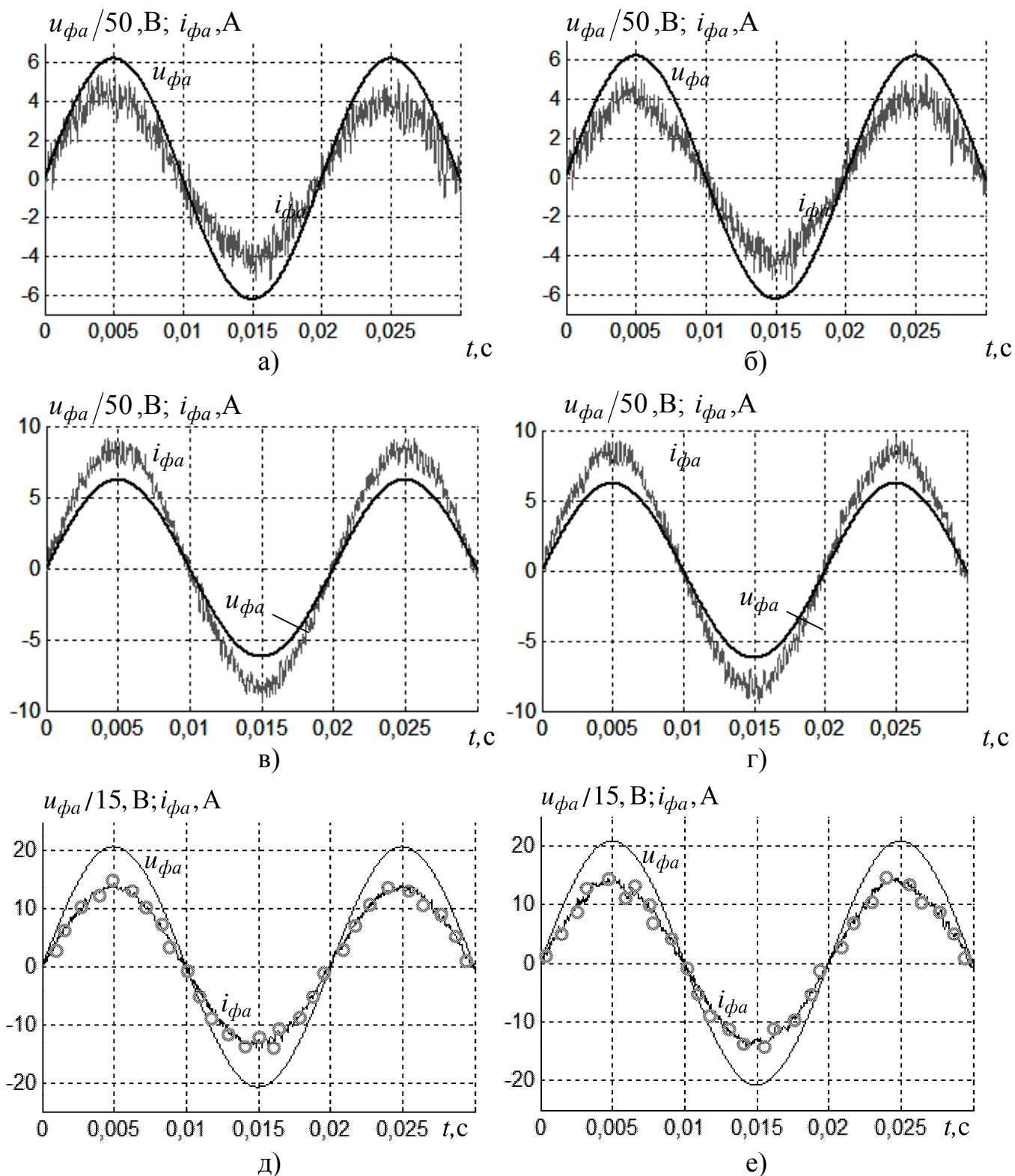


Рисунок 2.15. - Мережеві фазні напруга і струм в стаціонарному режимі роботи АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, при номінальному позитивному моменті навантаження: а, в, д - для $L_d = 0,075$ Гн; б, г, е - для $L_d = 0,03$ Гн (при швидкостях: а, б – для $\omega = 0,1 \omega_n$; в, г – для $\omega = 0,5 \omega_n$; д, е – для $\omega = \omega_n$)

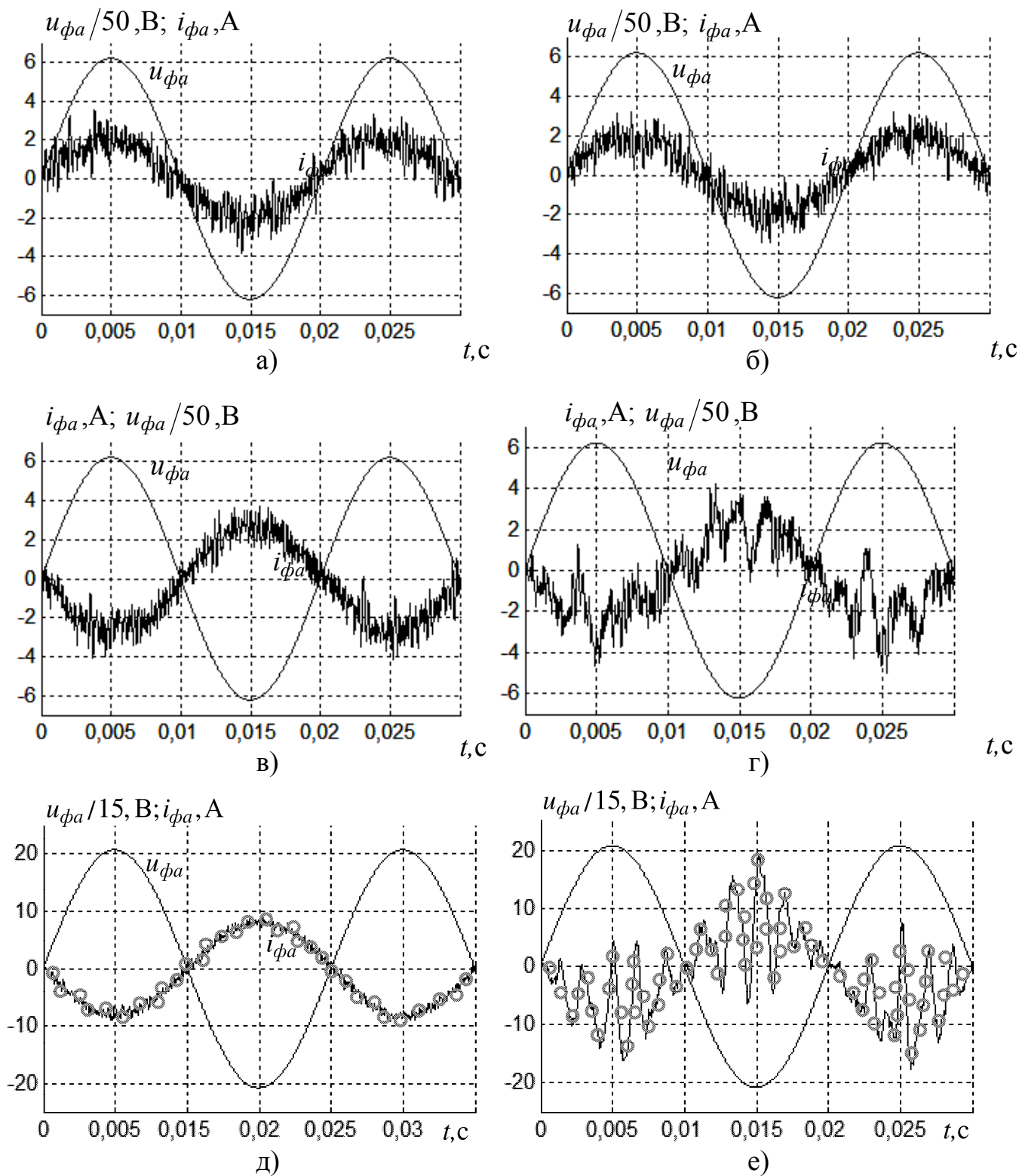


Рисунок 2.16. - Мережеві фазні напруга і струм в стаціонарному режимі роботи АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, при номінальному негативному моменті навантаження: а, в, д - для $L_d = 0,075 \text{ Гн}$; б, г, е – для $L_d = 0,03 \text{ Гн}$ (при швидкостях: а, б – для $\omega = 0,1 \omega_n$; в, г – для $\omega = 0,5 \omega_n$; д, е – для $\omega = \omega_n$)

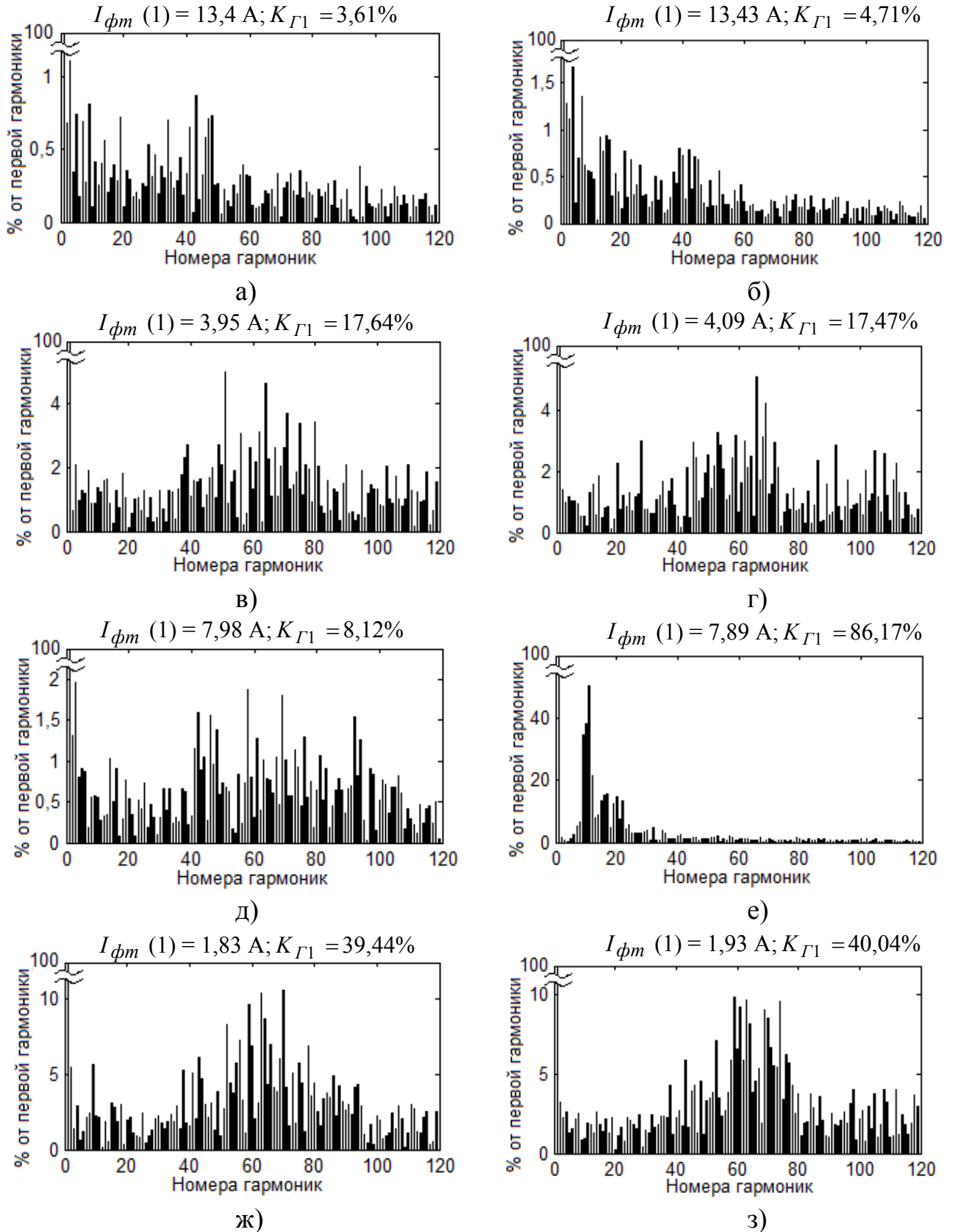


Рисунок 2.17. - Спектры гармоник в сетевом стромі: а, в, д, ж - для $L_d = 0,075 \text{ Гн}$; б, г, е, з - для $L_d = 0,03 \text{ Гн}$ (а, б, д, е - при $\omega = \omega_n$; в, г, ж, з - при $\omega = 0,1\omega_n$; а, б, в, г - для $M = M_n$; д, е, ж, з - для $M = -M_n$)

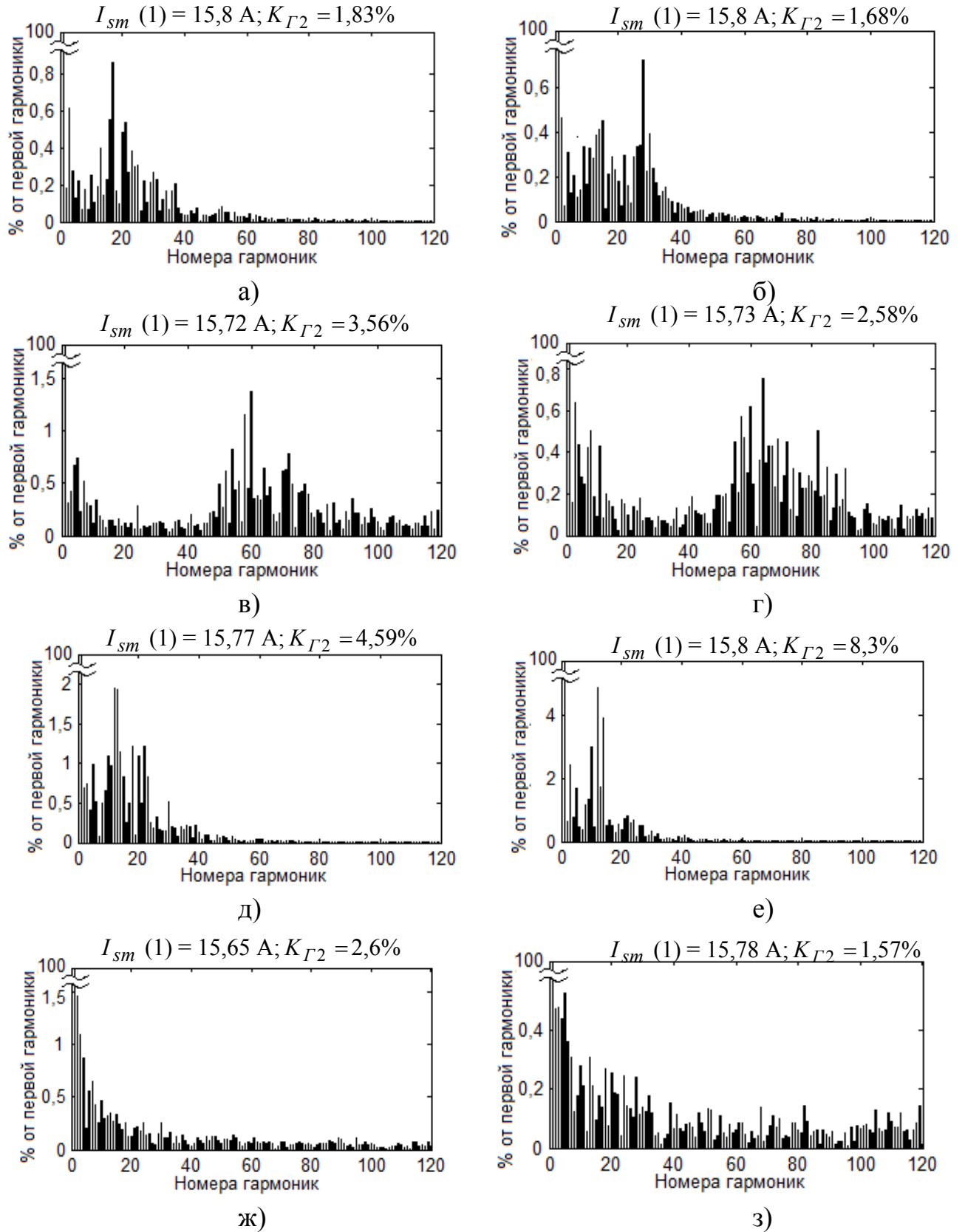


Рисунок 2.18. - Спектры гармоник в статорном струмі АД: а, в, д, ж – для $L_d=0,075 \text{ Гн}$; б, г, е, з – для $L_d=0,03 \text{ Гн}$ (а, б, д, е – при $\omega = \omega_n$; в, г, ж, з – при $\omega = 0,1\omega_n$; а, б, в, г – для $M = M_n$; д, е, ж, з – для $M = -M_n$)

З аналізу результатів цих розрахунків слідує, що при зменшенні швидкості двигуна для АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС (на відміну від АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного тиристорним випрямлячем), знижується амплітудне значення основних гармонік мережевих фазних струмів (при цьому амплітуда основної гармоніки статорних фазних струмів двигуна залишається незмінною). При цьому в номінальному режимі роботи АЕП з АІС-ШІМ, оснащений АВС, споживає мережеві фазні струми з амплітудними значеннями основної гармоніки на 20% меншими, ніж АЕП з АІС-ШІМ, обладнаний тиристорним випрямлячем. За допомогою створеної в розділі 1 імітаційної моделі АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, виконані розрахунки енергетичних показників електроприводу.

2.6. Вплив зміни внутрішніх параметрів елементів силового ланцюга АЕП з АІС-ШІМ на прогнозне управління активним випрямлячем

При функціонуванні АЕП спостерігається температурний зсув параметрів елементів його силового ланцюга: активних опорів і ємностей конденсаторів. Оскільки залежності (2.14) - (2.17) для розрахунку вектора струму мережі містять дані елементи, то важливим є дослідження впливу згаданого зсуву параметрів на працездатність запропонованого прогнозного управління АВС.

За допомогою розроблених імітаційних моделей АЕП з АІС-ШІМ і АВС виконані для збільшених в 1,5 рази значень активних опорів фазних резисторів мережевого фільтра розрахунки електричних процесів і енергетичних показників АЕП з АІС- ШІМ при використанні запропонованої прогнозуючої системи управління (САУЗ). Результати даних розрахунків представлені на рис. 2.20, рис. 2.21.

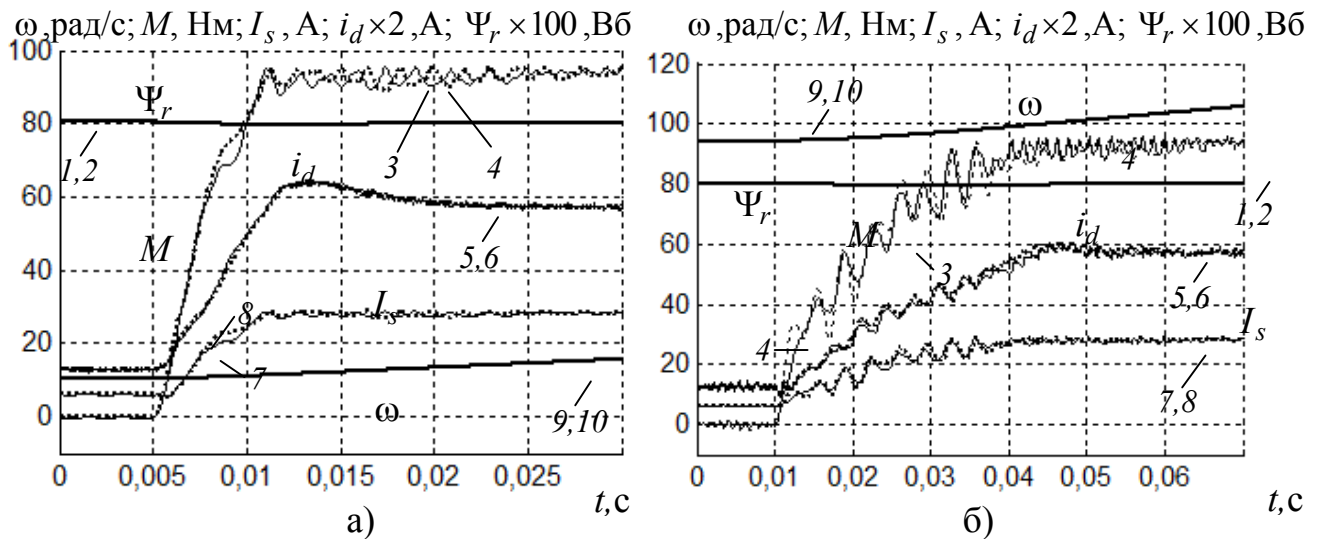


Рисунок 2.20. - Електромеханічні процеси відпрацювання поступово змінюваного дворового (від номінального значення) завдання на активну складову статорного струму (позитивної полярності) при $L_d=0,075\Gamma\text{H}$ в АЕП з АІС-ШІМ: а – для $\omega=0,1\omega_n$; б – для $\omega=0,9\omega_n$ (1, 3, 5, 7 и 9 – при R_K ; 2, 4, 6, 8 и 10 – при $1,5R_K$)

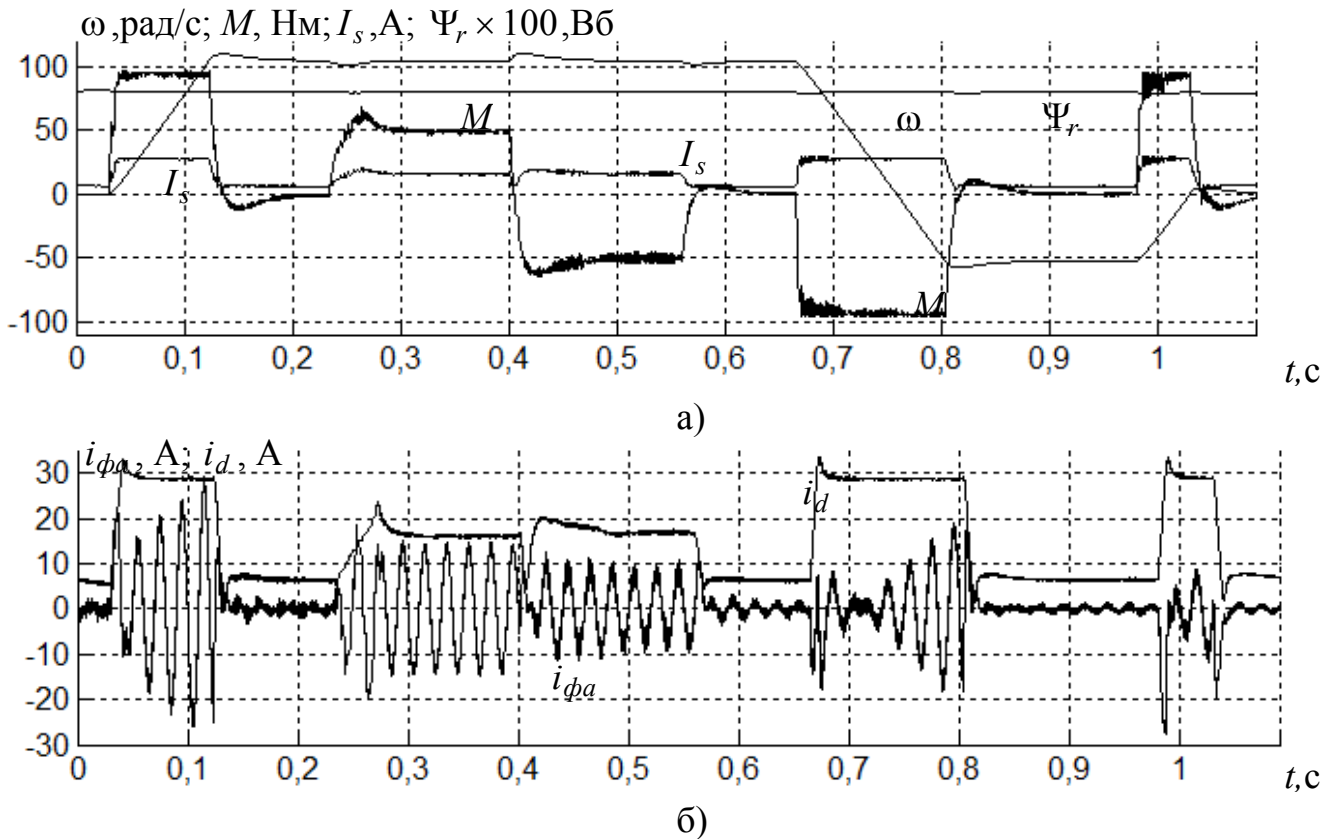


Рисунок 2.21. - Електромеханічні процеси двигуна (а), процеси зміни мережевого фазного струму і вихідного струму випрямляча (б) в АЕП з АІС-ШІМ і АВС (при $L_d=0,075\Gamma\text{H}$)

Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що запропонований спосіб прогнозування, при якому напрям зміни збільшення узагальненого вектора струму мережі на довільному міжкомутаційному інтервалі визначається по напрямку поточного узагальненого вектора вхідного струму АВС, нечутливий до температурної зміни внутрішніх параметрів елементів силового ланцюга АЕП (активних опорів резисторів і ємностей конденсаторів перетворювача частоти).

2. Розроблена на основі запропонованого прогнозного управління релейно-векторна система регулювання струму АВС дозволяє формувати мережеві фазні струми АЕП з АІС-ШІМ за формою близькими до синусоїдальних і підтримувати модуль значення мережевого коефіцієнта потужності зазначеного електроприводу близьким до одиниці (більше 0,99), а також зменшити індуктивність згладжувачого дроселя в 2,5 рази при збереженні високої якості регулювання параметрів режиму АЕП.

3. Встановлено, що зі зменшенням індуктивності згладжувачого дроселя в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, погіршуються значення мережевих енергетичних показників (а саме: мережевого коефіцієнта потужності і загального коефіцієнта гармонік струму мережі) зазначеного електроприводу, особливо - в генераторному режимі його функціонування.

4. Запропонований спосіб прогнозування (в порівнянні з відомими способами) характеризується відносною технічною простотою своєї реалізації, що досягається за рахунок, по-перше, виключення датчиків вхідної напруги АВС і, по-друге, спрощення обчислень задаючих комбінацій силових ключів випрямляча.

5. Отримані висока якість електромеханічних процесів і поліпшені енергетичні показники свідчать про можливість застосування АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, не тільки в загальнопромисловому електроприводі, а й - в позиційному і стежачому електроприводах.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Нормативно-правові документи, що регламентують дотримання вимог охорони праці

Дотримання вимог охорони праці регламентується нормативно-правовими документами, що прийняті для виконання на всіх підприємствах України і є обов'язковими для всіх фізичних та юридичних осіб. Такими документами є:

1. Закон України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 р. (нова редакція від 21 листопада 2002 р. з останніми поправками та доповненнями від 29 червня 2010 р.), який визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці, регулює за участю відповідних органів державної влади відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні [53].

2. Кодекс законів про працю України від 10 грудня 1971 р. з останніми поправками та доповненнями від 20 травня 2010 р., який визначає правові засади і гарантії здійснення громадянами України права розпоряджатися своїми здібностями до продуктивної і творчої праці, регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці, поліпшенню якості роботи, підвищенню ефективності суспільного виробництва і піднесенню на цій основі матеріального і культурного рівня життя трудящих, зміцненню трудової дисципліни і поступовому перетворенню праці на благо суспільства в першу життєву потребу кожної працездатної людини.

3. Закон України «Про загальнообов'язкове державне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності» від 23 вересня 1999 р. з останніми поправками та доповненнями від 01 червня 2010 р., який відповідно до Конституції України та Основ законодавства України про загальнообов'язкове

державне соціальне страхування визначає правову основу, економічний механізм та організаційну структуру загальнообов'язкового державного соціального страхування громадян від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які призвели до втрати працездатності або загибелі застрахованих на виробництві.

4. «Основи законодавства України про охорону здоров'я» від 19 листопада 1992 р. з останніми поправками та доповненнями від 12 лютого 2008 р., які гарантують, що кожна людина має природне невід'ємне і непорушне право на охорону здоров'я. Суспільство і держава відповідальні перед сучасним і майбутніми поколіннями за рівень здоров'я і збереження генофонду народу України, забезпечують пріоритетність охорони здоров'я в діяльності держави, поліпшення умов праці, навчання, побуту і відпочинку населення, розв'язання екологічних проблем, вдосконалення медичної допомоги і запровадження здорового способу життя. Основи законодавства України про охорону здоров'я визначають правові, організаційні, економічні та соціальні засади охорони здоров'я в Україні, регулюють суспільні відносини у цій галузі з метою забезпечення гармонійного розвитку фізичних і духовних сил, високої працездатності і довголітнього активного життя громадян, усунення факторів, що шкідливо впливають на їх здоров'я, попередження і зниження захворюваності, інвалідності та смертності, поліпшення спадковості.

5. Закон України «Про пожежну безпеку» від 17 грудня 1993 р. з останніми поправками та доповненнями від 18 вересня 2003 р., який вказує на те, що забезпечення пожежної безпеки є невід'ємною частиною державної діяльності щодо охорони життя та здоров'я людей, національного багатства і навколишнього природного середовища. Цей Закон визначає загальні правові, економічні та соціальні основи забезпечення пожежної безпеки на території України, регулює відносини державних органів, юридичних і фізичних осіб у цій галузі незалежно від виду їх діяльності та форм власності.

6. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» від 24 лютого 1994 р. з останніми поправками та

доповненнями від 29 червня 2010 р., що регулює суспільні відносини, які виникають у сфері забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя, визначає відповідні права і обов'язки державних органів, підприємств, установ, організацій та громадян, встановлює порядок організації державної санітарно-епідеміологічної служби і здійснення державного санітарно-епідеміологічного нагляду в Україні.

7. Нормативно-правові акти з охорони праці. Міжгалузеві та галузеві ДНАОП, стандарти системи стандартів безпеки праці (ГОСТ ССБП), Державні стандарти України з питань безпеки праці (ДСТУ), санітарні норми (СН), державні санітарні правила і норми (Дсан Пін), будівельні норми і правила (ДБН) та ін.

3.2. Небезпечні та шкідливі фактори на судні

До шкідливих і небезпечних факторів, які впливають на суднового електромеханіка можна віднести: підвищений рівень шуму і вібрації, високі електромагнітні випромінювання, недостатню освітленість робочого місця, підвищене значення напруги в електричних колах [54].

Шум. Висока енергоозброєність судів, їх насиченість різними пристроями і механізмами створюють умови для виникнення інтенсивного шуму. Його джерелом може бути будь яке нестійке тіло, виведене із стійкого стану зовнішньою силою. У фізіологічному сенсі під шумом мається на увазі будь-який звук, що порушує тишу і має шкідливий вплив на організм людини. Рівні шуму в судових приміщеннях нерідко перевищують санітарні норми: у машинних відділеннях морських суден – на 20 дБ, в службових на 25 дБ і більше. Більшість цих перевищень збігається з діапазоном частот 2000 – 6000 Гц, несприятливо діючих на організм електромеханіка, працюючого в машинному відділенні.

Специфічною особливістю праці електромеханіка є цілодобовий, часто багатомісячний безперервний вплив шуму на організм. Ступінь шкідливого впливу шуму на організм визначається його інтенсивністю, частотним спектром і

постійністю впливу, індивідуальною чутливістю організму, а також супутніми чинниками суднового середовища: вібрацією, НВЧ і ВЧ випромінюваннями, токсичними виділеннями полімерних матеріалів. Стонлюючий і шкідливий вплив шуму зростає із збільшенням його частоти

Шум справляє негативний вплив на слуховий аналізатор, центральну нервову систему, серцево – судинну і травні системи, а також викликає зміну гормональної регуляції організму.

Найбільш виражене підвищення порога слухової чутливості (до 15дБ і більше) спостерігається у членів машинних команд, що піддаються впливу шуму підвищеної інтенсивності. Порушення слуху у машинної команди в 10% випадків частіше, ніж у палубної.

Ступінь впливу шуму на центральну нервову систему залежить від його характеру і проявляється у скаргах на швидку стомлюваність, шум у вухах, головні болі, неспокійний сон, дратівливість, запаморочення, ослаблену пам'ять і увагу.

Під впливом інтенсивного шуму порушується також діяльність серцево - судинної системи. При невеликому стажі нерідко розвивається гіпотонія. Із збільшенням стажу роботи гіпотонія може, зміниться гіпертензією, а в подальшому і гіпертонічною хворобою серця.

Дія інтенсивного шуму може викликати порушення функцій травної системи. Спостерігаються зміни секреторної і моторної функцій шлунково-кишкового тракту. Відзначаються зміни і в обмінних процесах. Порушуються основний, вуглеводний білковий і жировий обміни речовин.

Вібрація. Головними джерелами вібрацій на судах є гребні гвинти, двигуни, валопроводи і допоміжні механізми.

У робітника, що протягом тривалого часу піддається безперервному впливу вібрації, можуть відбутися різні порушення у функціональному стані організму. При цьому залежно від інтенсивності коливань і часу їх дії можуть спостерігатися зміни в центральній і вегетативній нервовій системі, серцево - судинній системі, вестибулярному апараті. Вібрація діє на кору головного мозку, викликаючи

розвиток фазових станів і розлитого гальмування з одночасним розгальмуванням підкорних центрів.

Коливання з малою частотою і великою амплітудою можуть призводити до зміщення внутрішніх органів і появи вегетативних реакцій, що супроводжуються порушеннями секретної і моторної діяльності шлунково-кишкового тракту.

Характерним для дії вібрації є зниження збудливості органу рівноваги. Спостерігаються запаморочення і спонтанні вестибулярні симптоми, порушення ритму ністагму, вегетативні реакції.

Реакція серцево - судинної системи на дію вібрації протягом перших років роботи виражається гіпотонією, надалі розвивається в гіпертонію.

Електромагнітні випромінювання. Ступінь опромінення електричним полем залежить від рівня його напруженості і тривалості дії. Тривалість перебування електромеханіка в електричному полі повинна знаходитися в зворотній залежності від напруженості поля.

Випромінювана в навколишнє середовище електромагнітна енергія може чинити несприятливий вплив на організм людини. Механізм дії ЕМП пояснюється його тепловим і нетепловим (атермічним) ефектами. Тепловий ефект залежить від інтенсивності опромінення і характеризується підвищенням температури тіла, а також локальним виборчим нагріванням тканин, органів і клітин. Тривала дія ЕМП призводить до функціональних змін нервової системи, що проявляється в підвищеній стомлюваності, головному болю, сонливості, дратівливості, болю в області серця. Після припинення опромінення ці явища швидко проходять. Однак систематична дія ЕМП високої напруженості може привести до функціональних змін серцево - судинної системи і зміни показників периферичної крові. При порушенні техніки безпеки, в аварійних ситуація може мати місце опромінення високої інтенсивності, що викликає деструктивні зміни в органах і тканинах. Дія випромінювання НВЧ може призвести до розвитку катаракти. Відзначаються також порушення з боку ендокринної системи.

Ураження електричним струмом. Дія електричного струму на живий організм різноманітна. Можливі місцеві опіки, електроліз крові і лімфатичних

рідин, порушення функції нервової системи. До побічних дій електричного струму можна віднести механічні пошкодження (переломи, удари, вивихи), викликані падінням з висоти або різким мимовільним скороченням м'язів, а також ураження органів зору в результаті сліпучого впливу електричної дуги. Найбільш вразливі місця на тілі людини розташовуються на скронях, спині, тильних сторонах рук, гомілкях, потилиці і на шиї.

Прийнято всі види ушкоджень під впливом електричного струму поділяти на дві групи: електричні травми, тобто місцеве ураження організму, і електричні удари, які супроводжуються різким порушенням живих тканин.

Електричний удар може привести до судомного скорочення м'язів як з втратою так і без втрати свідомості, може викликати зупинку дихання і навіть зупинку серця, в результаті якої настає клінічна смерть, яка веде через 6-8 хв. до загибелі людини. Змінний струм частотою 50...60 Гц напругою до 500 В являє собою більшу небезпеку, ніж постійним. Із збільшенням частоти вражаюча дія струму зменшується, зростає його теплова складова.

До числа інших факторів, що впливають на результат ураження електричним струмом, належать підвищена температура і вологість, шум, вібрація, незадовільне освітлення, обмеженість приміщення тощо.

Освітленість. Забезпечуючи безпосередній зв'язок організму з навколишнім світом, світло є сигнальним подразником для органа зору й організму в цілому: достатнє освітлення діє тонізуюче, поліпшує протікання основних процесів вищої нервової діяльності, стимулює обмінні й імунобіологічні процеси, впливає на формування добового ритму фізіологічних функцій організму людини.

При недостатній освітленості або за наявності значних змін освітленості чи умов видимості органам зору необхідно пристосовуватися; це можливо завдяки властивостям очей - акомодації й адаптації.

Акомодація – це здатність ока пристосовуватися до ясного бачення предметів, що розташовуються від нього на різних відстанях.

Адаптація зорова – здатність ока змінювати чутливість при зміні умов освітлення. Завдяки процесу адаптації зоровий аналізатор має здатність працювати в широкому діапазоні освітленості.

Часті зміни рівнів яскравості призводять до зниження зорових функцій, розвитку стомлення внаслідок переадаптації ока. Зорове стомлення, викликане напруженою роботою та частою переадаптацією, призводить до зниження зорової і загальної працездатності.

Природний процес зниження видимості під час адаптації зору може стати причиною травмування людини, яка у цей період втрачає здатність візуального контролю свого перебування в небезпечній зоні на виробництві. Для наближення часу адаптації до нуля необхідно, щоб первинна і вторинна яскравості відрізнялися не більш ніж у 3-5 разів.

Світильники, що гойдаються, значно погіршують візуальне сприйняття, змушуючи зір увесь час переадаптовуватися. З цієї ж причини неприпустиме використання в приміщеннях ламп без освітлювальної арматури.

Недостатнє і нерівномірне освітлення робочих місць призводить до перенапруги зору, перевтоми організму, до виникнення надмірної нервової дратівливості, ослаблення уваги. У працюючих у таких умовах спостерігаються дефекти зору – короткозорість, зниження гостроти зору й інше.

Негативно впливає на зір не тільки недостатня освітленість, а й занадто яскраве освітлення. Перевищення норм яскравості веде до зниження функцій зору, викликає роздратування і різь в очах, головні болі.

Саме тому важливим фактором є правильний розрахунок освітлення в приміщенні машинного відділення.

3.3. Розрахунок освітлення в приміщенні судна

Розрахунок освітлення здійснюється по методу світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від підволоку і переборок.

Довжина приміщення $A = 12$ м, ширина - $B = 2$ м, висота - $H = 2,5$ м.
Напруга мережі 220 В.

Площа приміщення:

$$S = A \cdot B, \text{ м} \quad (3.1)$$

$$S = 12 \cdot 5 = 60 \text{ м}^2$$

Вибираємо систему загального рівномірного освітлення з люмінесцентними лампами. Вибираємо світильник типу 770а з чотирма люмінесцентними лампами ЛБ15.

Розрахуємо індекс приміщення:

$$i = (A \cdot B) / (h (A + B)) \quad (3.2)$$

$$i = (12 \cdot 5) / (2,5 \cdot (12 + 5)) = 1,4$$

Коефіцієнт використання світлового потоку, враховуючи що $\rho_{\text{п}} = 70\%$, $\rho_{\text{с}} = 50\%$, $\rho_{\text{р}} = 30\%$, $i = 1,1$, дорівнює $\eta = 0,27$.

Значення коефіцієнту запасу $K_3 = 1,3$.

Мінімальна освітленість E_{min} складає 100 лк.

Номінальний світловий потік люмінесцентної лампи ЛБ15 $\Phi_{\text{л}} = 780$ лм.

Коефіцієнт нерівномірності для люмінесцентних ламп приймаємо $Z = 1,1$.

Необхідне число світильників:

$$N = (E_{\text{min}} S K_3 Z) / (\Phi_{\text{л}} \eta) n \quad (3.3)$$

$$N = (100 \cdot 60 \cdot 1,3 \cdot 1,1) / (780 \cdot 0,27) \cdot 4 = 10,2$$

Отже для оптимальної роботи в приміщенні необхідно встановити 2 ряди по 5 світильників типу 770а з чотирма люмінесцентними лампами ЛБ15.

3.4. Заходи щодо зменшення впливу шкідливих факторів при роботі в машинному відділенні

Під час роботи із електричною установкою необхідно розробити комплекс заходів направлених на їх усунення, або в разі неможливості, вжити заходи направлени на зменшення їх шкідливого впливу на організм [57].

1. Захист від шуму. Радикальним вирішенням проблеми захисту від шуму є

зниження шуму в самому джерелі. Основні засоби - конструктивні. У першу чергу слід використовувати менш шумні двигуни. Крім того необхідно застосовувати засоби шумоізоляції дизелів від судових корпусних конструкцій шляхом їх установки на гумовометалевих амортизаторах, що забезпечують зниження шуму до санітарних норм.

Для зниження аеродинамічних шумів, створюваних двигунами, використовуються глушники різних конструкцій. Застосування глушників дозволяє знизити загальний рівень шуму на 10...12 дБ.

Для зниження механічного шуму необхідно послаблювати галасливість деталей і окремих вузлів агрегатів, зменшувати зазори між деталями і вузлами, виготовляти конструкції з матеріалів з великим внутрішнім тертям або із шумопоглинаючим покриттям.

При неможливості зниження шуму до санітарних норм технічними засобами цього домагаються шляхом організації раціональних режимів праці.

Ослаблення судового шуму досягається за допомогою планувальних заходів: джерела з найбільш інтенсивним шумом слід розташовувати якомога далі від приміщень екіпажу і пасажирів. Не рекомендується влаштовувати житлові та службові приміщення поблизу машинного відділення.

Крім розглянутого комплексу щодо зниження шуму на судах використовуються різні засоби індивідуального захисту. Залежно від способу застосування засобу індивідуального захисту для електромеханіка від впливу шуму діляться на внутрішні (протишумові вкладиші) і зовнішні (шоломи і навушники). Їх дія заснована на ослабленні звукової енергії внаслідок загасання звуку, що проходить через матеріали, що захищають проти шумів, до барабанної перетинки.

2. Захист від вібрацій. Заходи щодо зниження впливу вібрації на людину здійснюються шляхом зменшення вібрації в самому джерелі її виникнення, попередження розповсюдження коливальної енергії від її джерел та обмеження шкідливої дії вібрації на організм людини.

Для вирішення цих завдань у процесі проектування виготовлення та

складання двигунів, механізмів, пристроїв та обладнання виконуються заходи конструктивного і технологічного характеру, спрямовані на зменшення вібрацій в джерелі; застосовуються відповідні засоби віброізоляції, вібропоглинання і віброгасіння для зменшення поширення вібрації по повітрю і конструкціям; використовуються засоби комплексної автоматизації та дистанційного управління енергетичним установками, індивідуального захисту від вібрацій; організовують раціональний режим праці і медичний контроль.

За допомогою віброізоляційних засобів, до яких відносять віброізолюючі фундаменти і муфти, амортизатори, гнучкі патрубки, прокладки з гуми і пластмаси, досягається обмеження поширення вібрації від джерел. Для ослаблення вібрації в звуковому діапазоні частот на віброуючі металеві поверхні, фундаменти та суднові корпусні конструкції наносять вібропоглинаючі (демпфувальні) покриття.

3. Захист від електромагнітного випромінювання. Для запобігання несприятливої дії ЕМП важливим гігієнічним заходом є розробка режимів праці та відпочинку, що виключають перебування електромеханіка в зоні ЕМП високої напруженості.

З метою зниження або усунення електромагнітного випромінювання необхідно виконувати електрогерметізацію елементів схем, блоків, вузлів і установки, основних в цілому, а також екранування робочого місця. Екранування є одним з основних методів захисту від низькочастотних випромінювань і радіовипромінювань.

Для зниження напруженості поля внаслідок просочування енергії в інші приміщення необхідно екранувати окремі ділянки приміщень.

У якості індивідуальних засобів захисту від дії ЕМП застосовується спеціальний одяг, виготовлений з металізованої тканини: комбінезони, куртки з капюшонами, халати і фартухи. При роботі в зоні з потужність випромінювання понад 1000 мкВт/см^2 для захисту очей використовуються захисні окуляри.

З метою попередження захворювань, необхідно проводити періодичні медичні огляди.

4. Захист від уражень електричним струмом. Електрична ізоляція – це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, котрим вкривається поверхня струмоведучих частин, або котрим струмоведучі частини відділяються одна від одної. Стан ізоляції характеризується її електричною міцністю, діелектричними втратами та електричним опором. З метою забезпечення надійної роботи ізоляції здійснюються профілактичні заходи. Перш за все слід виключити механічні пошкодження, зволоження, хімічний вплив, запилення.

Електрозахисні засоби – це переносні засоби, призначені для захисту електромеханіка, що працює з електроустановками, від ураження електричним струмом, від дії електричної дуги та електромагнітного поля. За призначенням електрозахисних засобів умовно поділяють на ізолювальні, огорожувальні та допоміжні.

Ізолювальні електрозахисні засоби призначені для ізоляції від частин електрообладнання, котрі знаходяться під напругою, а також від землі. До них відносяться: ізолювальні та вимірювальні штанги, ізолювальні та електровимірювальні кліщі; покажчики напруги; ізолювані ручки монтерського інструменту; діелектричні рукавиці, боти та калоші; гумові килимки, доріжки, підставки; ізолювальні ковпаки та накладки; ізолювальні драбини.

Огорожувальні електрозахисні засоби призначені для тимчасового огороження струмоведучих частин обладнання. До них відносяться переносні огороження (ширми, бар'єри, щити, клітки). Умовно до них відносять і переносні попереджувальні плакати.

Допоміжні захисні засоби призначені для захисту персоналу від падіння з висоти (запобіжні пояси та страхувальні канати), для безпечного підймання на висоту (драбини, кігті), а також для захисту від світлового, теплового, механічного та хімічного впливів (захисні окуляри, протигази, рукавиці, спецодяг).

Таким чином, необхідно пильно слідкувати за можливими проявами шкідливих факторів, проводити політику на їх попередження та усунення, наблизити стан машинного відділення до вимог охорони праці.

РОЗДІЛ 4. ВИМОГИ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ЗАБРУДНЕННЮ СМІТТЯМ

4.1. Загальні положення

1.1.1 Ця частина Правил поширюється на обладнання і пристрої, призначені для запобігання забрудненню сміттям із суден, і застосовується в повному обсязі до всіх суден, зазначених в 1.1 частини «Загальні положення» цих Правил, якщо не застережене інше.

1.1.2 Загальна заборона скидання сміття в море

1.1.2.1 За винятком випадків, передбачених в 1.1.3-1.1.7, скидання в море будь-якого сміття забороняється.

1.1.2.2 За винятком випадків, передбачених в 1.1.6, забороняється скидання в море усіх видів пластмас, включаючи синтетичні троси, синтетичні рибальські сітки, пластмасові мішки для сміття і золу з інсинератора, що утворюється під час спалювання виробів з пластмаси, але не обмежуючись цим.

1.1.2.3 За винятком передбаченого в 1.1.6, забороняється скидання в море кулінарного жиру.

1.1.2.4 Із зіпсованим вантажем слід поводитись згідно з циркуляром МЕРС.1/Circ.809.

1.1.2.5 Обмеження по скиданню сміття у море, згідно з вимогами 1.1.3 ÷ 1.1.5 і 1.1.7 наведені в таблиці 1 пункту 2.3 резолюції МЕРС.295(71), як довідкові дані для користування, але перевага щодо обмеження скидання сміття у море надається вимогам цієї частини Правил.

1.1.3 Скидання сміття за межами особливих районів

1.1.3.1 Скидання видів сміття, наведених нижче, в море поза межами особливих районів дозволяється тільки тоді, коли судно знаходиться в дорозі, і настільки далеко від найближчого берега, наскільки це здійснене, але в будь-якому випадку не менше відстані:

.13-х морських миль від найближчого берега - харчових відходів, які пропущені через подрібнювач або млиновий пристрій. Такі подрібнені або

розмелені харчові відходи мають проходити через грохот з отворами розміром не більше 25мм;

.212-ти морських миль від найближчого берега - харчових відходів, які не були перероблені відповідно до підпункту .1вище;

.312-ти морських миль від найближчого берега - залишків вантажу, які не можуть бути видалені за допомогою звичайних методів вивантаження. Ці залишки вантажу повинні містити жодних речовин, класифікованих як шкідливі для морського середовища згідно з критеріями, наведеними в доповненні I Додатку V до Конвенції МАРПОЛ, враховуючи 1.4.3.

1.1.3.2 Скидання туш тварин має проводитись настільки далеко від найближчого берега, наскільки це можливо.

1.1.3.3 Миючі засоби або присадки, що містяться у воді для миття вантажних трюмів, палуб і зовнішніх поверхонь, можуть скидатися в море, але ці речовини не повинні завдавати шкоди морському середовищу, враховуючи вимоги інших частин цих Правил.

1.1.3.4 Якщо сміття змішане з іншими речовинами, скидання яких заборонено або підпадає під вимоги інших частин цих Правил, або забруднене ними, застосовуються більш суворі вимоги цих частин.

1.1.3.5 Інші, ніж зерно навалювальні вантажі, як вони визначені в правилі VI/1-1.2 Конвенції СОЛАС, повинні класифікуватися як шкідливі або не шкідливі для морського середовища згідно доповнення I Додатку V до Конвенції МАРПОЛ і відповідним чином декларуватися відправником вантажу (До суден, які здійснюють міжнародні рейси, застосовуються положення розділу 4.2.3 Міжнародного кодексу морського перевезення навалювальних вантажів (МКМПНВ); для суден, які не здійснюють міжнародні рейси, можуть використовуватися інші засоби декларування, що визначаються Адміністрацією).

1.1.4 Особливі вимоги до скидання сміття зі стаціонарних або плавучих платформ

1.1.4.1 За винятком, передбаченим в 1.1.4.2, забороняється скидання в море будь-якого сміття зі стаціонарних або плавучих платформ, а також з усіх інших суден, які ошвартовані біля платформ або перебувають в межах 500м від них.

1.1.4.2 Харчові відходи можуть скидатися в море зі стаціонарних або плавучих платформ, розташованих на відстані більше 12 морських миль від найближчого берега, і з усіх інших суден, що ошвартовані біля платформ або перебувають в межах 500м від них, але тільки тоді, коли відходи пропущені через подрібнювач чи млиновий пристрій. Такі подрібнені чи розмелені харчові відходи мають проходити через грохот з отворами розміром не більше 25мм.

1.1.5 Скидання сміття в межах особливих районів.

Скидання наведених нижче видів сміття в море в межах особливих районів дозволяється тільки тоді, коли судно перебуває в дорозі, і в такий спосіб:

1.1.5.1 Скидання в море харчових відходів має проводитись настільки далеко від найближчого берега, наскільки це здійснено, але не ближче 12 морських миль від найближчого берега або найближчого шельфового льодовика. Харчові відходи мають бути подрібнені чи розмелені і повинні проходити через грохот з отворами розміром не більше 25мм. Харчові відходи не повинні бути забруднені будь-яким іншим видом сміття. Скидання інтродукованих продуктів з птиці, включаючи домашню птицю та її частини, не дозволяється в районі Антарктики, якщо вони не оброблені для приведення їх у стерильний стан.

1.1.5.2 Скидання залишків вантажу, які не можуть бути видалені за допомогою звичайних методів вивантаження, здійснюється при дотриманні наступних умов:

.1 залишки вантажу, м'які засоби або присадки, що містяться в трюмній промивній воді, не повинні містити ніяких речовин, класифікованих як шкідливі для морського середовища, згідно з критеріями, наведеними в доповненні I Додатку V до Конвенції МАРПОЛ;

.2 як порт відходу, так і наступний порт заходу знаходяться в межах особливого району, і судно не здійснює переходу за межами особливого району між цими портами;

.3 в цих портах немає приймальних споруд, що відповідають відповідним вимогам;

.4 якщо присутні умови, зазначені в підпунктах .1–3, .5 і .6 вище, скидання промивної води, що містить залишки, з вантажного трюму має відбуватись настільки далеко від найближчого берега або найближчого шельфового льодовика, наскільки це здійснене, але не ближче 12 морських миль;

.5 інші, ніж зерно навалювальні вантажі, як вони визначені в правилі VI/1-1.2 Конвенції СОЛАС, повинні класифікуватися як шкідливі або не шкідливі для морського середовища згідно доповнення I Додатку V до Конвенції МАРПОЛ і відповідним чином декларуватися відповідником вантажу (див. примітку до 1.1.3.5); та

.6 миючі засоби або присадки, що містяться в трюмній промивній воді, не повинні містити ніяких речовин, класифікованих як шкідливі для морського середовища, з урахуванням керівництва, розробленого Організацією.

1.1.5.3 Миючі засоби і присадки, що містяться у воді для миття палуб ізовнішніх поверхонь, можуть скидатися в море, але тільки в тих випадках, якщо ці речовини не заподіють шкоди морському середовищу, враховуючи вимоги інших частин цих Правил.

1.1.5.4 До району Антарктики на додаток до вимог 1.1.5.1 і 1.1.5.2 застосовуються такі норми (з урахуванням 1.1.7.3):

.1 Кожна Сторона, з портів якої судна йдуть у рейс в район Антарктики чи в порти якої судна прибувають з району Антарктики, зобов'язується забезпечити, щоб, як тільки це буде практично можливо, були передбачені достатні споруди для приймання всього сміття з усіх суден, які не викликають надмірного простою і відповідають потребам суден, що користуються ними.

.2 Кожна Сторона забезпечує, щоб усі судна, що мають право плавати під її прапором, перед входом в район Антарктики мали на борту достатні ємкості для зберігання всього сміття при плаванні у цьому районі та мали домовленості про скидання такого сміття в приймальні споруди після виходу з цього району.

1.1.5.5 Якщо сміття змішане з іншими речовинами, скидання яких заборонено або скидання яких підпадає під вимоги інших частин цих Правил, або забруднене ними, то застосовуються більш суворі вимоги цих Правил.

1.1.6 Винятки

1.1.6.1 Вимоги 1.1.2 - 1.1.5 і 1.1.7 не застосовуються:

.1 до скидання сміття з судна з метою забезпечення безпеки судна та людей, що знаходяться на його борту, або для порятунку людського життя на морі; або

.2 до аварійної втрати сміття в наслідок пошкодження судна або його устаткування, за умови що до і після пошкодження, що трапилось, були прийняті всі розумні запобіжні заходи по запобіганню або зведенню до мінімуму такої аварійної втрати; або

.3 до аварійної втрати з судна знарядь лову, за умови, що були прийняті всі розумні запобіжні заходи для запобіганню такої втрати; або

.4 до скидання з судна знарядь лову для захисту морського середовища або з метою безпеки цього судна чи його екіпажу.

1.1.6.2 Положення 1.1.3, 1.1.5 і 1.1.7, що стосуються випадків, коли судно знаходиться в дорозі, не застосовуються до скидання харчових відходів, якщо очевидно, що зберігання на борту цих харчових відходів створює неминучий ризик для здоров'я людей, що знаходяться на борту.

1.1.7 Скидання сміття в полярних водах.

1.1.7.1 Полярні води означають арктичні води і/або район Антарктики.

Район Антарктики означає морський район до півдня від паралелі 60° південної широти.

Район арктичних вод означає морський район як він визначений в Правилі 13 Додатку V до Конвенції МАРПОЛ.

1.1.7.2 В арктичних водах будь-яке скидання сміття у море, яке дозволене згідно з 1.1.3, повинне відповідати наступним додатковим вимогам:

.1 скидання харчових відходів дозволяється коли судно знаходиться настільки далеко, наскільки це здійснено, від районів, де згуртованість льоду перевищує 1/10, але у будь-якому випадку на відстані не

менше 12 морських миль від найближчого берега, найближчого шельфового льодовика або найближчого припаю;

.2 харчові відходи повинні бути подрібненими або розмолотими і проходити через решето з отворами розміром не більше 25мм. Харчові відходи не повинні змішуватися з будь-якими іншими видами сміття;

.3 харчові відходи не повинні скидатися на лід; і

.4 скидання туш тварин забороняється; і

.5 скидання залишків вантажу, які не можуть бути видалені за допомогою звичайних засобів вивантаження, дозволяється тільки тоді, коли судно знаходиться в дорозі і коли виконуються наступні умови:

.5.1 залишки вантажу, миючі засоби або присадки, що містяться в трюмній промивній воді, не повинні містити ніяких речовин, класифікованих як шкідливі для морського середовища, з урахуванням Керівництва, розробленого Організацією;

.5.2 як порт відходу, так і наступний порт заходу знаходяться в межах арктичних вод, і судно не буде здійснювати перехід за межами арктичних вод між цими портами;

.5.3 в цих портах немає достатніх приймальних споруд, приймаючи до уваги Керівництво, розроблене Організацією; і

.5.4 якщо умови, зазначені в підпунктах .5.1, .5.2і .5.3, дотримані, скидання промивної води, що містить залишки, з вантажного трюму повинне відбуватись настільки далеко, наскільки це здійснено, від районів, де згуртованість льоду перевищує 1/10, але у будь-якому випадку на відстані не менше 12 морських миль від найближчого берега, найближчого шельфового льодовика або найближчого припаю.

1.1.7.3 У районі Антарктики скидання сміття в море, яке дозволене згідно з 1.1.5, повинне відповідати наступним додатковим вимогам:

.1 скидання сміття відповідно до 1.1.5.1і 1.1.5.2 повинні відбуватись настільки далеко, наскільки це здійснено, від районів, де згуртованість льоду

перевищує 1/10, але у будь-якому випадку на відстані не менше 12 морських миль від найближчого припаю;

.2 харчові відходи не повинні скидатися на лід.

1.1.7.4 Експлуатація в полярних водах повинна враховуватися, в міру необхідності, у плані управління ліквідацією сміття і плакатах відповідно до вимог розділу 4.

1.1.7.5 З метою зведення мінімуму ризиків, пов'язаних зі смертністю тваринного вантажу, слід розглянути питання поводження з тушами тварин, їх оброблення і зберігання на борту, коли судна, що перевозять такий вантаж, експлуатуються в полярних водах. Зокрема, слід враховувати положення Керівництва 2012 року щодо здійснення Додатку V до Конвенції МАРПОЛ (резолюція МЕРС.219(63)) з поправками, внесеними резолюцією МЕРС.239(65) і Керівництва 2012 року з розроблення планів управління ліквідацією сміття (резолюція МЕРС.220(63)).

4.2. Обладнання і пристрої для збирання і обробки сміття та інсинератори

2.1.1 На кожному судні повинні бути передбачені пристрої для збирання і зберігання сміття.

Залежно від таких факторів, як тип судна, район плавання, чисельність екіпажу тощо, судна можуть обладнуватися інсинераторами і пристроями для обробки сміття.

2.1.2 Механізми і трубопроводи пристроїв для обробки сміття і інсинераторів повинні відповідати вимогам частини VIII «Системи і трубопроводи», частини IX «Механізми» і частини XI «Електричне обладнання», а пристрої для керування, регулювання і контролю - вимогам частини XV «Автоматизація» Правил класифікації та побудови морських суден.

2.1.3 Суднові трубопроводи, електричне обладнання і пристрої автоматизації, передбачені для пристроїв обробки сміття і інсинераторів для морських суден і суден змішаного плавання (море-ріка) повинні відповідати

вимогам частин VIII «Системи і трубопроводи», XI «Електричне обладнання» і XV «Автоматизація» Правил класифікації та побудови морських суден.

2.1.4 Кожне судно валовою місткістю 400 та більше і кожне судно, на якому допускається перевезення 15 або більше людей, і кожна стаціонарна або плавуча платформа повинні забезпечуватися Журналом операцій зі сміттям. Він може бути частиною офіційного судового журналу чи електронним журналом операцій, що підлягає схваленню Адміністрацією з урахуванням Керівництва, розробленого ІМО*, або в будь-якому іншому вигляді і складається за формою, наведеною у Доповненні II до Додатку V до Конвенції МАРПОЛ

4.2.1. Пристрої для збирання і зберігання сміття

2.2.1 Пристрої для збирання сміття можуть бути знімними або убудованими безпосередньо в корпус судна.

2.2.2 Регістру повинний бути представлений погоджений із замовником розрахунок сумарної місткості пристроїв для збирання сміття з урахуванням передбачуваного району і режиму експлуатації судна і числа людей на борту.

Місткість пристроїв для збирання господарського сміття $G_{ГСМ}$ повинна визначатися за формулою:

$$V_{ГСМ} = G_{ГСМ} * n * T$$

де: $G_{ГСМ}$ – нагромадження господарського сміття відповідно до режиму експлуатації з розрахунку на особу за добу:

сухе побутове сміття, m^3 - $G_{ГСМ} = k * 0,002$,

тверді харчові відходи, m^3 - $G_{ГСМ} = k * 0,003$;

пластмаса, m^3 - $G_{ГСМ} = k * 0,002$,

$k = 1,0$ для суден, що виконують рейси тривалістю 8 годин і більше;

$k = 0,5$ для суден, що виконують рейси тривалістю менше 8 годин;

n – кількість людей;

T – періодичність спорожнювання пристроїв для збирання господарського сміття, діб.

Місткість пристроїв для збирання господарського сміття $G_{ГСМ}$ повинна визначатися окремо для сухого побутового сміття, пластмаси і твердих харчових відходів.

2.2.3 Пристрої для збирання сміття, виконані безпосередньо в корпусі судна, повинні бути виготовлені зі сталі, не повинні мати отворів у стінках і днищі, крім розвантажувального. Внутрішні поверхні повинні бути гладкими, з ухилом днища не менш 30° у бік розвантажувального отвору.

Розвантажувальні отвори не повинні мати бурту в нижній частині.

Кришки розвантажувальних отворів повинні мати привод для їхнього відкривання, що забезпечує надійну роботу за будь-яких умов експлуатації судна.

2.2.4 В якості знімних пристроїв для збору сміття можуть застосовуватись бочки, металеві ємкості, ящики, мішки-контейнери або урни на колесах.

Ці ємкості повинні мати виразне маркування, що відображає категорію сміття, що збирається, і розрізнятися кольором, формою, розміром. Ємкості повинні відповідати вимогам 2.1.1.11 частини VI «Протипожежний захист» Правил класифікації та побудови морських суден.

2.2.5 Всі пристрої повинні бути закріплені задля запобігання втрати, розсипання або втрати будь-якого сміття, яке в них міститься.

2.2.6 Пристрої для збирання сміття повинні мати кришки, що забезпечують щільне закриття отворів для приймання сміття.

2.2.7 Пристрої для збирання та зберігання сміття повинні забезпечувати збирання та зберігання сміття за наступними категоріями (див. доповнення II Додатку V до Конвенції МАРПОЛ), залежно від того, що застосовне до судна:

Частина I

Для всіх видів сміття, крім залишків вантажу, як вони визначені в 1.2.

A Пластмаси.

B Харчові відходи.

C Побутові відходи (макулатура, ганчір'я, скло, метал тощо.).

D Кулінарний жир.

E Зола з інсинератора.

F Експлуатаційні відходи.

G Туші тварин.

H Знаряддя лову.

I Електронні відходи.

Частина II

Для всіх видів залишків вантажу, як вони визначені в 1.2.

J Залишки вантажу не шкідливих для морського середовища (не ШМС).

K Залишки вантажу шкідливих для морського середовища (ШМС).

2.2.8 Пристрої для збирання і зберігання сміття повинні розміщуватися в місцях, зручних для дозволеного скидання сміття в море, здавання в приймальні споруди, транспортування до місць обробки або спалювання. Пристрої можуть бути встановлені на відкритій палубі або у вентильованих приміщеннях, ізольованих від житлових і службових приміщень. У всіх випадках сміття необхідно зберігати таким чином, щоб не виникало загрози здоров'ю людини і безпеці.

Місце зберігання спресованих паперових і картонних пакетів має забезпечувати тримання їх сухими.

2.2.9 Пристрої для збирання сміття, що розміщуються у відповідних приміщеннях на судні (наприклад, машинне відділення, житлова палуба, кают-компанія, камбуз, інші житлові та робочі приміщення) повинні мати чітке маркування про призначення згідно з 2.2.7і мають відрізнятись за формою, розміром або розташуванням, та за кольором.

2.2.10 Сміття категорії А(див. 2.2.7) рекомендується сепарувати (розділяти і зберігати) за наступними типами:

- пластмаси, що утилізуються (стіроформ, поліетилен і подібні);
- пластмаси, що не утилізуються, і пластмаси, що змішані зі сміттям, який не є пластмасою.

Сміття категорії С рекомендується сепарувати за наступними типами:

- ганчір'я;
- скло;

- алюмінієві банки;
- папір, картон, гофрокартон;
- деревина;
- метал;
- сміття, яке може становити небезпеку для судна або людей (промаслене дрантя, електролампи, кислоти, хімікати, батарейки тощо.);
- електротехнічні та електронні відходи, що утворюються на борту (наприклад: електронні карти, пристрої, прилади, обладнання, комп'ютери, картриджі принтерів і т. д.).

4.2.2. Пристрої для обробки і скидання сміття в море

2.3.1 Пристрої для здрібнювання сміття повинні забезпечувати здрібнення його до часток, що не перевищують 25мм.

2.3.2 Пристрої для пресування сміття необхідно установлювати у відсіку з достатнім простором для експлуатації агрегату, а також для зберігання сміття, що підлягає переробці. Це приміщення повинне мати систему промивання прісною водою, комінгси, палубні шпігати, достатню вентиляцію, а також протипожежне обладнання. Протипожежне обладнання повинне відповідати вимогам Додатку 2 до резолюції МЕРС.244(66).

2.3.3 Пристрої для скидання сміття в море повинні знаходитися під палубою перегородок і закриватися кришками, що защіпаються.

2.3.4 Пристрої для скидання сміття в море повинні бути постачені табличками з точною вказівкою умов користування ними.

Суднові інсинератори потужністю до 4000кВт повинні відповідати, прийнятим резолюцією МЕРС.244(66) «Стандартні технічні вимоги до суднових інсинераторів 2014 року», вимогам при їх сертифікації для установки на суднах і мати схвалення типу Регістра і Адміністрації.

4.2.3. Розміщення обладнання і пристроїв

2.5.1 Знімні пристрої для збирання сміття повинні бути встановлені на відкритій палубі або в ізольованих від житлових і службових приміщень місцях, що мають вентиляцію.

2.5.2 Пристрої для пресування сміття повинні встановлюватися в приміщеннях, достатніх для зберігання сміття, що підлягає обробці, і здійснення технологічного процесу. Приміщення повинні прилягати до районів розташування господарсько-провізійних комор. Приміщення повинні бути обладнані засобами для обмивання прісною водою, комінгсами, шпігатами, достатньою вентиляцією, а також ручними або автоматичними протипожежними засобами.

2.5.3 Інсинератори можуть встановлюватися в машинних або окремих приміщеннях.

Інсинератор, розташований у машинному приміщенні, повинний бути відділений екраном. Його розташування повинне задовольняти вимогам 1.12 і 1.13 частини VII «Механічні установки» Правил класифікації та побудови морських суден. Якщо інсинератор розташований в окремому приміщенні, це приміщення класифікується як «машинне приміщення» згідно 1.2 частини VII «Механічні установки» Правил класифікації та побудови морських суден.

2.5.4 При розміщенні інсинератора в окремому приміщенні повинні бути передбачені:

.1 припливно-витяжна вентиляція, що забезпечує достатній приплив повітря, необхідний для роботи інсинератора;

.2 автоматична пожежна сигналізація відповідно до 4.2.1 частини VI «Протипожежний захист» Правил класифікації та побудови морських суден;

.3 система пожежогасіння відповідно до п. 10 табл. 3.1.2.1 частини VI «Протипожежний захист» Правил класифікації та побудови морських суден.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз відомих силових схем асинхронного електроприводу на основі автономного інвертора струму.

2. Запропоновано математичний опис АІС і АВС.

3. Створені цифрові імітаційні моделі призначені для дослідження в сталих і перехідних режимах роботи АЕП з АІС-ШІМ його електромагнітних і електромеханічних процесів (з урахуванням запропонованих способів автоматичного управління), а також енергетичних показників.

4. Розроблений для АЕП з АІС-ШІМ математичний опис і створені на його основі цифрові імітаційні моделі враховують фактичні дискретні властивості і несинусоїдальну форму вхідних і вихідних струмів і напруг розглянутого АЕП, що дозволяє наблизити розраховані з їх допомогою електромагнітні процеси до реальних значень.

5. Встановлено, що запропонований спосіб прогнозування, при якому напрям зміни збільшення узагальненого вектора струму мережі на довільному міжкомутаційному інтервалі визначається по напрямку поточного узагальненого вектора вхідного струму АВС, нечутливий до температурної зміни внутрішніх параметрів елементів силового ланцюга АЕП (активних опорів резисторів і ємностей конденсаторів перетворювача частоти).

6. Розроблена на основі запропонованого прогнозного управління релейно-векторна система регулювання струму АВС дозволяє формувати мережеві фазні струми АЕП з АІС-ШІМ за формою близькими до синусоїдальних і підтримувати модуль значення мережевого коефіцієнта потужності зазначеного електроприводу близьким до одиниці (більше 0,99), а також зменшити індуктивність згладжувачого дроселя в 2,5 рази при збереженні високої якості регулювання параметрів режиму АЕП.

7. Встановлено, що зі зменшенням індуктивності згладжувачого дроселя в АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, погіршуються значення мережевих енергетичних показників (а саме: мережевого коефіцієнта потужності і загального

коефіцієнта гармонік струму мережі) зазначеного електроприводу, особливо - в генераторному режимі його функціонування.

8. Запропонований спосіб прогнозування (в порівнянні з відомими способами) характеризується відносною технічною простотою своєї реалізації, що досягається за рахунок, по-перше, виключення датчиків вхідної напруги АВС і, по-друге, спрощення обчислень задаючих комбінацій силових ключів випрямляча.

9. Отримані висока якість електромеханічних процесів і поліпшені енергетичні показники свідчать про можливість застосування АЕП з АІС-ШІМ, оснащеного АВС, не тільки в загальнопромисловому електроприводі, а й - в позиційному і стежачому електроприводах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аракелян А. К. Оптимизация работы автономного инвертора тока в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. К. Аракелян, К. В. Солодов, Н. И. Шаварин // Электротехника. – 2002. – №1. – С. 19-24.
2. Башарин А. В. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат., 1982. – 392 с.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1984. – 559 с.
4. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
5. Бродовский В. Н. Приводы с частотно-токовым управлением / В. Н. Бродовский, Е. С. Иванов. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.
6. Волков А.В. Исследование особенностей прогнозирующего управления асинхронным электроприводом с автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012(19). – С. 90-93.
7. Волков А. В. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока на запираемых тиристорах с прогнозирующим релейно-векторным регулированием статорного тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // Электротехника. – 2008. – №10. – С. 6-17.
8. Волков А. В. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока с широтно-импульсной модуляцией / А. В. Волков, И. А. Косенко // Технічна електродинаміка. Тем. вип.: Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч.1. – С. 81-86.
9. Волков А. В. Совершенствование прогнозирующего релейно-векторного управления активным выпрямителем тока в асинхронном электроприводе с

- автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // Технічна електродинаміка. – 2010. – №6. – С. 24-34.
10. Волков А. В. Цифровая модель непосредственного преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией, нагруженного на асинхронный двигатель / А.В. Волков, Н.Л. Антонов // Электротехника та електроенергетика. – 2003. – №2. – С. 67-71.
 11. Высоковольтный привод переменного тока PowerFlex7000 с воздушным охлаждением: Руководство пользователя, Бюллетень 7000А. – Кембридж, Канада. – 7000A-UM151A-RU-P. – 2007. – 456 с.
 12. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. – С.-П.: Корона принт, 2001. – 320 с.
 13. Гольдфарб Л. С. Теория автоматического управления Ч.1 / Л. С. Гольдфарб, А. В. Балтрушевич, Г. Г. Круг и др. – М.: Высш. школа, 1968. – 424 с.
 14. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 31 с.
 15. ДСТУ 3595-97. Електроприводи змінного струму загального призначення. Загальні технічні вимоги . – Введ. 1998-07-01. – К.: Держстандарт України, 1998. – 42 с.
 16. Дьяконов В. П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В. П. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 576 с.
 17. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель/ В.П. Дьяконов. - М.: ДМК-Пресс, 2008. - 784с.
 18. Ефимов А. А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А. А. Ефимов, Р. Т. Шрейнер. – Новоуральск: НГТИ, 2001. – 250 с.
 19. Жемеров Г. Г. Анализ процессов в активном управляемом выпрямителе – источнике тока в системе пуска асинхронных машин / Г. Г. Жемеров, В. Ю. Колесник // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – №6 – С. 19-25.

20. Зайцев А. И. Регулируемый электропривод и его роль в энергосбережении / А. И. Зайцев, Ю. С. Лядов // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж, 2006. – №2. – С. 35-37.
21. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие / Г. С. Зиновьев. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
22. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
23. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
24. Костенко Д. В. Улучшение качества выходного напряжения автономного инвертора в составе преобразователя частоты со звеном постоянного тока / Д. В. Костенко, С. Л. Трибулькевич, В. В. Трибулькевич // Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2007. – С. 112-118.
25. Кривицкий С. О. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами / С. О. Кривицкий, И. И. Эпштейн. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
26. Лазарев Г. Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок – эффективная технология энерго и ресурсосбережения на тепловых электростанциях / Г. Б. Лазарев // Силовая электроника. – 2007. – №3. – С. 41-48.
27. Лаппе Р. Измерения в энергетической электронике / Р. Лаппе, Ф. Фишер. – Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
28. Маевский О. А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
29. Метельский В. П. Управление частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами при просадках и провалах питающего напряжения / В. П. Метельский, А. Г. Лохматов // Вісн. Кременчуцького держ. університету. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. №4(33). – С. 57-59.

30. Перельмутер В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В. М. Перельмутер. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
31. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков. – Дніпропетровськ: НГУ, 2006. – 470 с.
32. Плехов А. С. Система управления электроприводом с автономным инвертором тока/ А. С. Плехов, А. И. Зайцев // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж, 2009. – №2. – С. 51-54.
33. Рехенберг К. Влияние частоты пульсаций напряжения преобразователей частоты на срок службы изоляции обмоток частотно-управляемых трехфазных асинхронных двигателей / К. Рехенберг // Технічна електродинаміка. – Киев. – 2000. – №2.– С. 56-58.
34. Рехенберг К. Определение перенапряжений в частотно-регулируемых асинхронных машинах низкого напряжения / К. Рехенберг, Ц. Фишер // Технічна електродинаміка. – Киев. – 2001. – №3.– С. 59-62.
35. Рудаков В. В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В. В. Рудаков, И. М. Столяров, В. А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.
36. Руденко В. С. Преобразовательная техника / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 431 с.
37. Сандлер А. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
38. Сандлер А. С. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией для управления асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Ю. М. Гусяцкий. – М.: Энергия, 1968. – 96 с.
39. Свидченко С. Ю. Эффективность асинхронного электродвигателя в приводе/ В. Н. Мещеряков, Д. В. Пешков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – Липецк: ЛГТУ, 2009 – №2. – С. 30-32.

40. Слежановский О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
41. Хернтер М. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств Multisim. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 488с.
42. Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники / И. М. Чиженко, В. С. Руденко, В. И. Сенько. – М.: Высш. шк., 1974. – 430 с.
43. Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений /Под общ. Ред. к. т. н. В. Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.
44. Чиженко И. М. Справочник по преобразовательной технике / И. М. Чиженко, П. Д. Андриенко, А. А. Баран и др. – К.: Техніка, 1978. – 447 с.
45. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. –М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
46. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
47. Шрейнер Р. Т. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, И. А. Мухаматшин // Электротехника. – 2000. – №10. – С. 43-49.
48. Шрейнер Р. Т. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, Ю. А. Дмитренко. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
49. Шрейнер Р. Т. Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, И. А. Мухаматшин // Электротехника. – 2005. – №9. – С. 47-53.
50. Шрейнер Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург: ГОУ, 2008. – 279 с.
51. Эпштейн И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока / И. И. Эпштейн. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.
52. Гандзюк М.П. Основи охорони праці. К; Каравела; 2005. – 408 с.

53. Закони України Про охорону праці: Закон України / Відомості Верховної Ради України. - 1992. - № 49, - Ст. 668.
54. Международная конвенція з охорони людського життя на морі - СОЛАС - 74 (SOLAS - 74), вид. 2008.
55. Международная конвенція про запобігання забруднення моря - МАРПОЛ - 73/78, вид. 2004.
56. Правила пожежної безпеки на морських суднах України, НАПБ.Б. 01.013 - 2007. - Київ: Основа, 2007.
57. Русаловський А.В. Правові та організаційні питання охорони праці. Університет «Україна»; К., 2009- 295с.