Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп’ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Метод реалізації елементів інтелектуальних енергетичних систем

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КСМм-20-1

Любацький А. В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність

123 «Комп’ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Комп’ютерні системи та мережі
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Бовчалюк С. Я.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ _____ Коваленко А. А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2021 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп’ютерної інженерії та управління

Кафедра електронних обчислювальних машин

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 «Комп’ютерна інженерія»
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп’ютерні системи та мережі
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
“____” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Любацькому Артему Володимировичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Метод реалізації елементів інтелектуальних енергетичних систем

затверджена наказом по університету від “ 05 ” листопада 2021 р. № 1656 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13 грудня 2021 р.

3. Вхідні дані до роботи 1) технології керування технологічними об’єктами і процесами в енергомережах
2) математичний апарат нечіткого логічного висновку
3) архітектура керуючих автоматів паралельної дії
4) HDL-модель логічного керуючого автомату паралельної дії

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі
1) Аналіз існуючих і перспективних сучасних технологій побудови енергетичних систем
2) Принципи побудови класичних керуючих автоматів паралельної дії
3) Способи розкриття невизначеності та особливості застосування різних типів функцій приналежності нечітких множин
4) Синтез структури АПДН
5) Принципи побудови HDL-моделі класичного ЛКА ПД
6) HDL-модель АПДН
7) Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайд-презентація – 12 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз стану питання та постановка завдань	09.11.21-12.11.21	
	дослідження		
2	Дослідження принципів побудови класичних	13.11.21-15.11.21	
	керуючих автоматів паралельної дії		
3	Синтез автомату паралельної дії із	16.11.21-25.11.21	
	нечіткою логікою		
4	HDL-модель класичного ЛКА ПД	26.11.21-27.11.21	
5	Синтез HDL-моделі АПДН	28.11.21-03.12.21	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	04.12.21-07.12.21	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові	08.12.21-09.12.21	
	та її попередній захист		
8	Подання кваліфікаційної роботи на	10.12.21-11.12.21	
	рецензування		

Дата видачі завдання 08 листопада 2021 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Бовчалюк С. Я.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 60 с., 15 рис., 2 дод., 30 джерел.

SMART GRID, РОЗУМНА ЕНЕРГЕТИКА, ТЕХНОЛОГІЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ, ЛОГІЧНІ КЕРУЮЧІ АВТОМАТИ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, HDL-МОДЕЛЬ АВТОМАТУ.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження технологій і технічних засобів побудови інтелектуальних енергетичних систем Smart Grid і визначення можливостей для імплементації у них елементів інформаційної технології паралельного логічного керування на базі керуючих автоматів паралельної дії з можливістю реалізацій функцій нечіткого логічного висновку.

У ході виконання кваліфікаційної роботи виконано аналіз існуючих і перспективних сучасних технологій побудови енергетичних систем та наведено загальну характеристику пошкоджень електричних мереж і методів їх пошуку. Розглянуто архітектуру і принцип дії класичних керуючих автоматів паралельної дії та виконано синтез структури автомату паралельної дії з нечіткою логікою, наведено способи розкриття невизначеності та особливості застосування різних типів функцій приналежності нечітких множин. Розглянуто HDL-модель класичного логічного керуючого автомату паралельної дії і розроблено HDL-модель автомату паралельної дії з нечіткою логікою.

ABSTRACT

Maste’s thesis: 60 pages, 15 figures, 2 appendices, 30 sources.

SMART GRID REASONABLE ENERGY, TECHNOLOGY OF PARALLEL LOGICAL CONTROL, LOGICAL CONTROL AUTOMATICS, FUZZY LOGIC, HDL-MODEL OF AUTOMATIC.

The purpose of the qualification work is to study technologies and technical means of building intelligent energy systems Smart Grid and identify opportunities for implementation of elements of information technology parallel logic control based on control machines of parallel action with the ability to implement fuzzy inference functions.

In the course of qualification work the analysis of existing and perspective modern technologies of construction of power systems is carried out and the general characteristic of damages of electric networks and methods of their search is resulted. The architecture and principle of operation of classical control automat of parallel action are considered and the synthesis of the structure of the parallel action automat with fuzzy logic is performed. The HDL-model of the classical logical control automat of parallel action is considered, and developed an HDL model of a parallel-acting automat with fuzzy logic.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АПДН – автомат паралельної дії з нечіткою логікою

БА – блок адресації

БІ – блок індикації

БВО – блок вибору операцій

БЛК – блок логічного керування

БЛО – блок логічної обробки

БПК – блок пам’яті команд

БПЗК – блок пам’яті заборонених комбінацій

БПС – блок пам’яті станів

БПП – блок пам’яті переходів

ЄС – європейський союз

ЗЗ – замикання на землю

КЗ – коротке замикання

КПЕ – ключові показники ефективності

ЛА – лічильник адреси

ЛКА – логічний керуючий автомат

ЛКА ПД – логічний керуючий автомат паралельної дії

МКП – мікропроцесорний керуючий пристрій

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема

ПЛ – повітряна лінія

ПЛК – програмований логічний контролер

ПЛМ – програмована логічна матриця

ППЛК – паралельний програмований логічний контролер

СКЗ – системи критичного застосування

СП – схема порівняння

ТА – технологічний агрегат

HDL – мова опису апаратури (англ., Hardware Description Language)

DSO – оператори системи розподілу (англ., Distribution System Operators)

Smart Grid – розумні мережі, розумна енергетика

TSO – оператори систем передачі (англ., Transmission System Operators)

ВСТУП

В останні роки можна спостерігати значні зміни в енергетиці промислово розвинених країн світу. Ці процеси також не оминули енергетичні системи України: збільшується питоме споживання енергії на людину; зростає кількість споживаної електричної енергії, включно з виникненням її дефіциту; збільшується навантаження на електричні мережі. Окрім вищевказаних факторів додатковим викликом для енергетичних компаній є стрімкий розвиток так званих «зелених» джерел енергії – вітроелектростанцій, сонячних станцій, тощо. Для цих джерел енергій характерними є: переважно невелика генерована потужність, нестабільність генерованої потужності (добова, погодна, тощо), розосередженість за електричними мережами і ще значна кількість характеристик, які не дозволяють достатньо просто інтегрувати такі джерела до існуючих мереж, без внесення певних змін до організації та обслуговування енергетичного господарства.

За останні роки з вибуховою силою збільшується кількість моделей електричних автомобілів, в деяких державах навіть прийняті рішення про відмову від автомобілів з двигунами внутрішнього згорання у найближчі роки або десятиліття. До того ж намітилась тенденція із застосування електромобілів для перерозподілу електроенергії: заряд відбувається у нічні години мінімального навантаження, а надлишок енергії віддається в електромережу в денні години на спеціально обладнаних місцях паркування. Цей фактор додатково впливає на електричні мережі із можливістю, у перспективі, корекції як добової завантаженості, так і просторової (оскільки заряд відбувається в одній точці електромережі, а розряд в іншій).

Вищевказані виклики (як такі, що вже є у наявності, так і перспективні) додатково накладаються на типові технічні проблеми Українських електромереж: більше половини з них мають 100% знос, недосконалий

моніторинг технічного і прогнозного їх стану; якісною електроенергією забезпечено близько 65% користувачів; тривалість відключень досягає 100 годин і більше (що на порядок вище, ніж у розвинених країнах); втрати при передачі електроенергії неприпустимо великі і сягають 15-20%, а подекуди і до 40%. Таким чином, за технічним станом, оснащенням обладнанням, схемним рішенням і методам оптимального керування електромережі України потребують докорінної реконструкції [16]. Одна із теоретичних спроб подолання цих проблем описана в [17], однак в роботі основну увагу приділено оптимізації структури електричної мережі, у той час, як питанням «інформаційної» або «інтелектуальної» їх наповненості уваги практично не приділялось.

Однією із концепцій, яка має ефективно розв’язувати вказані проблеми, є побудова інтелектуальних енергетичних мереж Smart Grid (розумні мережі або розумна енергетика), що можна визначити, як швидкозростаючий комплекс технологій, технологічних процесів, улаштувань та додатків, за допомогою яких створюються електронні комунікації нового покоління [6, 10]. Слід зауважити, що на даний час в Україні ця технологія, фактично, знаходиться у зачатковому стані, хоча окремі елементи енергосистеми можна однозначно характеризувати, як «розумна енергетика». Так можна згадати атомні електростанції: без наявності «інтелекту» об’єкти такого класу просто не можна собі уявити.

Однак потрібно зауважити, що вся «інтелектуальність», переважно, носить безпековий характер, оскільки атомна енергетика відноситься до об’єктів критичного застосування, аварії на яких просто неприпустимі, що й показала Чорнобильська трагедія 1986 року. Саме в атомній енергетиці широке застосування знайшли так звані ПЛІС-технології: вони дозволяють будувати системи керування і захисту ядерних реакторів із заданими значеннями достовірності обробки інформації, безвідмовності роботи, безпечності функціонування, тощо.

Враховуючи вищевказане, головною метою роботи є дослідження технологій і технічних засобів побудови інтелектуальних енергетичних систем Smart Grid і визначення можливостей для імплементації у них елементів інформаційної технології паралельного логічного керування на базі керуючих автоматів паралельної дії з можливістю реалізацій функцій нечіткого логічного висновку.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз існуючих і перспективних сучасних технологій побудови енергетичних систем

Електроенергетика переживає швидкі зміни, спричинені властивими ринку проблемами інтеграції відновлюваних джерел енергії в електромережі. Додаткові проблеми розподілу генерації швидко змінюють енергетичний ландшафт, і учасники ринку, безперечно, відчують ці наслідки у 2020-21 році.

Вкажемо три основні тенденції в енергетиці, що призвели до значних змін у 2020 році [15].

Тенденція №1. Дедалі більше ринків переходять до розрахунків у режимі реального часу. У 2021 році енергопостачальні підприємства Австралії перейдуть від 30-хвилинних розрахункових періодів до 5-хвилинних, збільшивши їхню кількість з 48 до 288 за добу. У міру того, як країни та комунальні підприємства інвестують у розширення інфраструктури відновлюваних джерел енергії, перехід на такі рішення, швидше за все, стане більш реальним і на інших ринках електроенергії по всьому світу. Наближаючись до розрахунків у режимі реального часу, комунальні служби зможуть швидше реагувати на мінливий споживчий попит, що зрештою знизить витрати на електроенергію для споживачів та збільшить прибуток комунальних служб.

Тенденція №2. Точне прогнозування матиме дедалі більше значення у створенні стабільної електромережі. Зростання використання відновлюваних джерел енергії, як і раніше, кидатиме виклик вже існуючим з високим базовим навантаженням на користь розподіленої генерації та нестійких джерел енергії, що залежать від погоди. Оскільки виробництво

електроенергії стає все більш нестабільним і децентралізованим, планувальники, трейдери та ризик-менеджери повинні мати здатність миттєво реагувати на зміну умов попиту та пропозиції. З переходом до використання відновлюваних джерел енергії в режимі реального часу та збільшенням обсягу інвестицій у них, роль точного прогнозування зростатиме для побудови більш надійної мережі.

Тенденція №3. Дедалі більше організацій впроваджуватимуть цифровізацію, штучний інтелект та передову аналітику. Застарілі процеси більше не впливатимуть на енергетичну галузь, оскільки з оновленням даних у міру руху до ринків у реальному часі та запровадження відновлюваних джерел енергії та розподіленої генерації з'являться і сучасні рішення. Енергетичні та комунальні компанії продовжать нарощувати технологічні можливості, щоб пом'якшити проблеми, такі як значне збільшення обсягу даних та нестабільність джерел енергії.

Такі технології, як штучний інтелект та комп'ютерне навчання, дають трейдерам уявлення про такі закономірності, як зміна виробництва енергії вітру та піковий попит на енергію. Вони також звужують межі невизначеності, автоматизують ручні операції і дозволяють трейдерам зосередитися на високоінтелектуальних видах діяльності. Компанії розпочинають підготовку до фундаментальних змін на ринку електроенергії, інтегруючи штучний інтелект, комп'ютерне навчання та передову аналітику вже сьогодні, щоб бути готовими до особливостей ринку електроенергії завтрашнього дня.

Усі три розглянуті тенденції чітко вписуються у концепцію «інтелектуалізації» сучасних енергетичних мереж, що отримав загальновживаний термін Smart Grid. Загальні тенденції розбудови інтелектуальних енергетичних мереж Smart Grid показані в [24].

На думку Європейської Комісії, що займається питаннями розвитку технологічної платформи в області енергетики, Smart Grid можна описати наступними аспектами функціонування [27]: гнучкість – мережа має

підлаштовуватись під вимоги користувача; доступність – мережа має бути доступною для нових користувачів; надійність – мережа має гарантувати захищеність і якість доставки електроенергії; економічність – найбільшу цінність мають являти інноваційні технології у поєднанні із ефективним керуванням функціонування електричної мережі. Отже необхідно проаналізувати існуючі електромережі на відповідність деяким з цих аспектів.

Європейські системні оператори енергетичного ринку Європи запропонували перелік показників для відстеження еволюції інтелектуальних мереж на рівні розподілу. Вони були підготовлені в результаті роботи спільної робочої групи TSO та DSO, створеної в березні 2020 року з ініціативи ENTSO-E та чотирьох європейських асоціацій DSO: CEDEC, E.DSO, Eurelectric та GEODE [7].

КПЕ включають сім показників для операторів розподільних систем (DSO) та один загальний показник для операторів передачі та розподілу. Ці показники були розроблені для національних регулюючих органів Європи у якості відповіді на вимоги Директиви ЄС з електроенергії щодо нової методології, що дозволяла б відстежувати модернізацію інфраструктури за допомогою інтелектуальних мереж з акцентом на енергоефективність та інтеграцію відновлюваних джерел енергії.

Існує шість загальних проблем, із якими стикаються DSO:

- співробітництво в процесі експлуатації та планування мережі;
- обмін інформацією про довгострокове планування мережевих інвестицій;
- генерація енергії та щоденне задоволення попиту;
- співробітництво для скоординованого доступу до ресурсів;
- забезпечення безпечного доступу;
- надійний розвиток та експлуатація мереж.

Отже були визначені наступні основні показники ефективності DSO:

- спостережуваність системи: для вимірювання здатності підтримувати «належний моніторинг» відповідних вузлів/ліній мережі;

- керованість системи: для вимірювання здатності утримувати мережу під «належним контролем»;

- активне керування системою: для вимірювання здатності виконувати активне керування мережею у щоденній/короткочасній роботі;

- планування інтелектуальної мережі: для вимірювання можливості використання проектування та планування для задоволення фактичних потреб мережі у середньостроковій та довгостроковій перспективі, гарантуючи економічну ефективність оновлення мережі та найбільш ефективне використання існуючих активів;

- прозорість доступу до даних та обмін між заінтересованими сторонами: здатність забезпечити доступ до даних усім заінтересованим сторонам;

- локальні ринки гнучкості та залучення клієнтів: вимірювання того, наскільки клієнт залучений в управління енергосистемою та має можливість надавати послуги мережам, та для вимірювання того, наскільки реалізовані місцеві угоди між місцевим ринком гнучкості та споживачами, а також який вклад клієнт може внести до енергосистеми;

- інтелектуальне управління активами: для оцінки використання передових стратегій, інструментів та методів управління активами з акцентом на моніторинг стану активів та зниження ризиків.

Сучасна електрична мережа України, як власне і мережі більшості інших країн, являє у більшості собою радіальну структуру (рисунок 1.1), що лише іноді буває закільцьованою [16, 17]. Ця структура є «жорсткою» і такою, що виконує лише функції доставки електричної енергії кінцевому споживачу і певні регуляторно-захисні функції, як такої інтелектуальної складової практично немає. Під регуляторно-захисними функціями необхідно розумі лише функції підтримання заданого діапазону напруги і захисту електромережі у випадку виникнення аварійних або нештатних

ситуацій. Причому остання функція, фактично, передбачає лише аварійне відключення проблемної ділянки від загальної мережі, з подальшим встановленням причин аварії і її усуненням в ручному або автоматичному (при наявності технічних засобів) режимі. Через відсутність гнучкості мереж страждає також її доступність, оскільки підключення додаткових споживачів (особливо з достатньо великою потужністю споживання) може вимагати навіть змін у топології мережі. Надійність функціонування мережі складається з великої кількості факторів і детально буде розглядатись у майбутньому (з точки зору інформаційного наповнення мережі), але, з точки зору безперебійного отримання енергії пересічним кінцевим споживачем, вона є недостатньою.

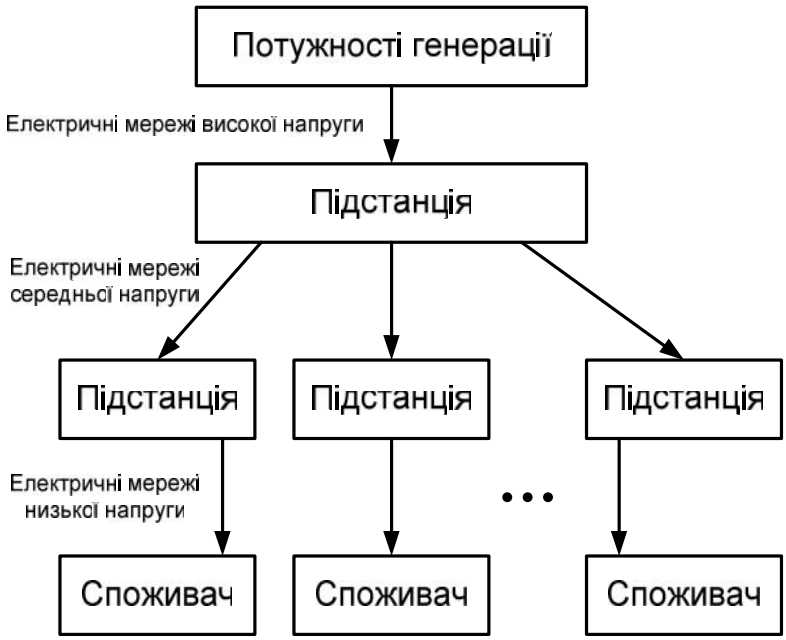

Рисунок 1.1 – Спрощена узагальнена структура технічного забезпечення електричної мережі

Таким чином можна стверджувати, що назріло питання внесення змін у поточний стан справ, і одним із перспективних напрямків є впровадження концепції Smart Grid. Питаннями інтелектуалізації мереж займається достатньо багато науковців і наукових організацій, але практична реалізація

цих ідей є лише епізодичною і носить, нажаль, несистемний характер. Так в роботі [18] запропонована концепція відомчої системи збору метеоданих, що дозволяє автоматизувати збір, обробку і передачу достовірних метеоданих про параметри оточуючого середовища. Подібний підхід пропонується застосувати для формування інформаційної система, яка б могла виконувати функції збору технічних параметрів роботи електромережі, функції автоматичних перемикань або відключень в електромережі і, у перспективі – функції прогнозування і, при можливості, запобігання аномальним або аварійним режимам роботи електромережі.

Технічна реалізація подібної системи вимагає різнорідного обладнання, яке за виконуваними функціями можна умовно поділити на щонайменше чотири великі групи:

- елементи збору інформації (різного роду датчики струмів, напруг, метеопараметрів, тощо);
- елементи, що формують зв’язок (дротовий, оптоволоконний, радіо, GSM, тощо);
- елементи обробки інформації (контролери, комп’ютери, сервери і т.п.);
- виконавчі елементи (лінії електропередач, трансформатори, роз’єднувачі, перемикачі та ін.).

Серед елементів першої групи можна згадати технології компанії LineVision [13]. Технології передачі даних безпосередньо електромережею Prime і G3-PLC є прикладами реалізації елементів другої групи. У якості проектних і вже реалізованих рішень технології Smart Grid можна згадати наступні: розробка управління енергетики Нью-Йорка NYPA у партнерстві з Electric Power Group та Bonneville Power Administration – блок фазових вимірювань (PMU) та аналітична платформа, що дозволить комунальному підприємству контролювати роботу мережі в режимі реального часу; розробка компанії LF Energy у партнерстві з GE Renewable Energy, Schneider Electric, RTE, Alliander та іншими компаніями енергетичного сектора –

перший проект у рамках DSAS, що спрямований на вирішення проблем переходу на відновлювані джерела енергії шляхом оптимізації електричних підстанцій за допомогою технології з відкритим вихідним кодом; технологія PACIS – цифрова система моніторингу, захисту та управління підстанції [8, 28, 29].

У рамках даної кваліфікаційної роботу основну увагу буде приділено третій групі з перерахованих елементів, а конкретно – контролерам, що призначені для виконання функцій прийому інформації від, наприклад, датчиків, її попередньої обробки і, або передачі на централізовані пункти обробки і зберігання даних, або безпосереднього керування виконавчими елементами. Саме до цих контролерів мають пред’являтись найбільш жорсткі вимоги із безвідмовності роботи, швидкодії та надійності роботи.

Фрагмент можливої структури інтелектуальної електричної мережі із розташуванням тільки датчиків і мікроконтролерів показано на рисунку 1.2.

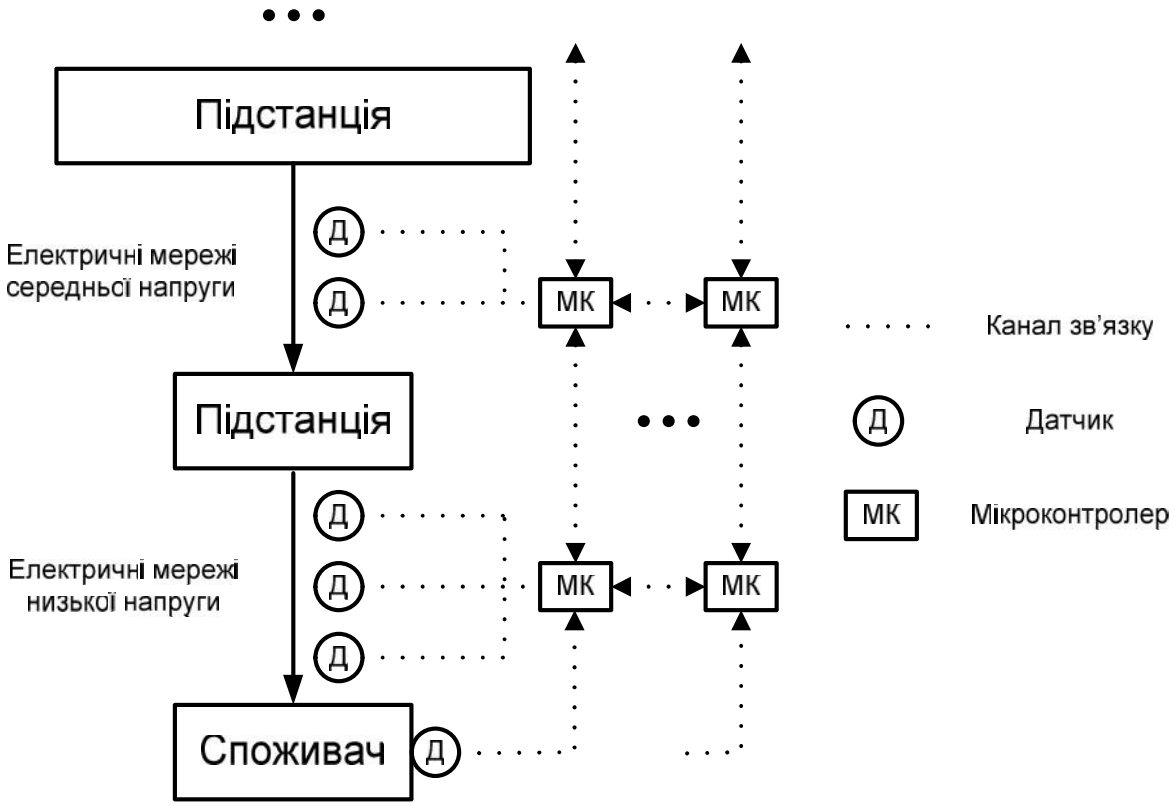

Рисунок 1.2 – Частина структури енергомережі з елементами Smart Grid

1.2 Загальна характеристика пошкоджень електричних мереж і методи їх пошуку

Розподіл електроенергії між споживачами здійснюється за допомогою ліній електропередач, які утворюють розподільні мережі. Незважаючи на вдосконалення конструкції повітряних ліній електропередачі (ПЛ) та електричних апаратів, аварійні пошкодження в системах електропостачання неминучі.

У загальному випадку лінія вважається пошкодженою, якщо стан її ізоляції або стан струмопровідних жил не задовольняє вимогам нормативних документів (ГОСТ, ДСТУ, ПУЕ та ін.). Виділяють два основних види ушкоджень: порушення цілісності ізоляції і порушення цілісності токопровідних жил [11].

Ушкодження ізоляції призводять до електричних замикань, які поділяються на симетричні та несиметричні. При симетричному короткому замиканні (КЗ) всі три фази перебувають у однакових умовах, тобто. має місце трифазне замикання. Всі інші види КЗ називаються несиметричними, тому що при них окремі фази знаходяться у різних умовах. До несиметричних КЗ відносяться [19]:

- однофазні замикання «на землю» (ЗЗ), тобто. з’єднання фази з нейтраллю або з «землею» в мережах із ізольованою нейтраллю;
- двофазні КЗ, тобто. з’єднання між собою двох фаз;
- двофазні ЗЗ.

Пошкодження ізоляції супроводжується також і її пробоєм, який може бути повним або неповним. При повному пробої перехідний опір пошкодження близько до нуля. Неповний пробій визначається по відмінному від нуля перехідному опору [5].

Якщо в одній з точок мережі виникає пошкодження і створюється неприпустимий аварійний режим, пошкоджені лінії виявляються засобами релейного захисту та автоматики, після чого здійснюється їх відключення.

З урахуванням всіх причин умовний споживач в Україні в середньому протягом року не отримує послуг з електропостачання 1279 хвилин (21,3 години), у той же час за кордоном цей показник за 2009 рік склав 84,3 хв. і надалі скорочується [26]. В умовах ринкових відносин між постачальниками та споживачами електричної енергії одним з наслідків аварійного відключення енергії стає відшкодування збитків споживачам. Українське законодавство передбачає матеріальну відповідальність постачальників перед споживачами, зокрема й відповідальність електропостачальних організацій. У судовій практиці вже неодноразово мали місце випадки задоволення позовів споживачів про стягнення збитків від недовідпущення електроенергії з електропостачальної організації. Законодавством розвинених країн передбачені прогресивні шкали оцінки збитків із боку споживача від припинення подачі електричної енергії.

Значною мірою аварійність в електричних мережах залежить від природних стихійних явищ та складних погодних умов на території проходження повітряних ліній. Згідно з дослідженнями [16, 17], близько 85% всіх порушень у мережах припадає на частку ПЛ. Основними ж причинами ушкоджень ПЛ є: поверхневі та інші пробої ізоляції; ожеледь-морозові відкладення на проводах; навантаження від вітру; вібрація, «танець» та схльостування проводів; ослаблення механічної міцності деталей опор; ушкодження, що наносяться лініям транспортом та механізмами.

Серед методів пошуку та діагностики пошкоджень і аварійних режимів ліній електропередач згадаємо наступні [25]:

- високочастотні дистанційні методи;
- низькочастотні дистанційні методи;
- індукційний метод пошуку аварій;
- контроль аварійних режимів за зміною електромагнітного поля.

До цього слід додати методи виявлення явища виникнення ожеледі на лініях електропередач:

- гравітаційний метод діагностики;

- локаційний метод діагностики;
- метод інструментально-параметричної діагностики.

Практично усі перераховані методи і підходи до виявлення ознак відмов, аварійних режимів, пошкоджень в електромережах, дозволяють отримати інформацію у вигляді електричних параметрів (струм, напруга, опір, ємність, частота, тощо) що формуються відповідними датчиками. Саме ці сигнали, або параметри електричного кола, після відповідної первинної обробки, можуть бути використані мікроконтролером у якості вхідних даних для прийняття рішення про стан електричної мережі або конкретного технологічного обладнання.

1.3 Постановка завдань дослідження

У роботах [3, 4] показано, що одним із перспективних напрямків реалізації елементів інтелектуальних енергетичних систем є застосування інформаційної технології паралельного логічного керування на базі безпечного ПЛІС-контролера паралельної дії. Слід зазначити, що ця технологія розроблялась і була практично реалізована для керування технологічними об’єктами безперервної циклічної дії, у тому числі критичного застосування (відповідальних, надійних, безвідмовних). Але процеси в електричних мережах носять, переважно, невизначений характер і тому безпосереднє застосування вказаної технології в енергетиці не може дати значних переваг у порівнянні із класичними методами і технологіями послідовної дії. У той же час елементи нечіткої логіки і математики, що були застосовані при розв’язанні задач в [14], у поєднанні із інформаційною технологією паралельного логічного керування, можуть дати ефективний інструмент для побудови елементів технічної реалізації Smart Grid.

У зв’язку із зазначеним актуальною є розв’язання науково-прикладної задачі розробки методу реалізації елементів інтелектуальних енергетичних

систем. Відповідно до зазначеної мети необхідно розв’язати наступні часткові завдання дослідження:

- провести аналіз існуючих і перспективних сучасних технологій побудови енергетичних систем;
- надати загальну характеристика пошкоджень електричних мереж і визначити методи їх пошуку;
- розглянути класичний керуючій автомат паралельної дії;
- виконати синтез структури автомату паралельної дії з нечіткою логікою;
- розглянути HDL-модель класичного ЛКА ПД;
- виконати розробку HDL-моделі автомату паралельної дії з нечіткою логікою.

2 КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ АВТОМАТІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ ДІЇ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ SMART GRID

2.1 Класичні керуючі автомати паралельної дії

Базова структура керуючого автомату паралельної дії, що є ядром технології паралельної обробки інформації, показана на рисунку 2.1. Керуючий автомат складається з наступних елементів: блоку індикації – БІ; схеми порівняння – СП; блоку вибору операцій – БВО; блоку логічного керування – БЛК; лічильника адреси – ЛА; вихідного регістру – ВР; а також блоків пам’яті станів, команд, переходів і заборонених комбінацій – БПС, БПК, БПП, БПЗК. Принциповою особливістю показаної структури є керування процесом обробки програми потоком вхідних станів, тобто потоком, який формують в асинхронній послідовності інтервалів дискретного автоматного часу «дозволені» комбінації фактичних станів керованого об’єкта і зовнішнього середовища. Для такої структури зовсім нехарактерна така проблема всіх без виключення класичних мікропроцесорних контролерів послідовної дії, як «зависання», що позитивно відображується на надійнісних характеристиках керуючих автоматів. Детально робота автоматів подібного класу викладена в [3, 4].

В останні роки можна спостерігати за розвитком і все більш широким практичним використанням методів і засобів створення систем критичного застосування (СКЗ) на основі мікроелектронних компонентів паралельної дії із застосуванням ПЛІС. Їх використання надало можливість підвищити швидкодію, надійність, достовірність обробки інформації в СКЗ, а також дозволило підвищити показники безпечності за рахунок усунення ризиків, що пов’язані із застосуванням операційних систем і програмною реалізацією алгоритмів керування відповідальними технологічними процесами. Як приклад реально існуючої СКЗ, яку можна пропонувати в якості прототипу

для створення систем керування для Smart Grid, можна навести безпечний ПЛІС-контролер S4C [4].

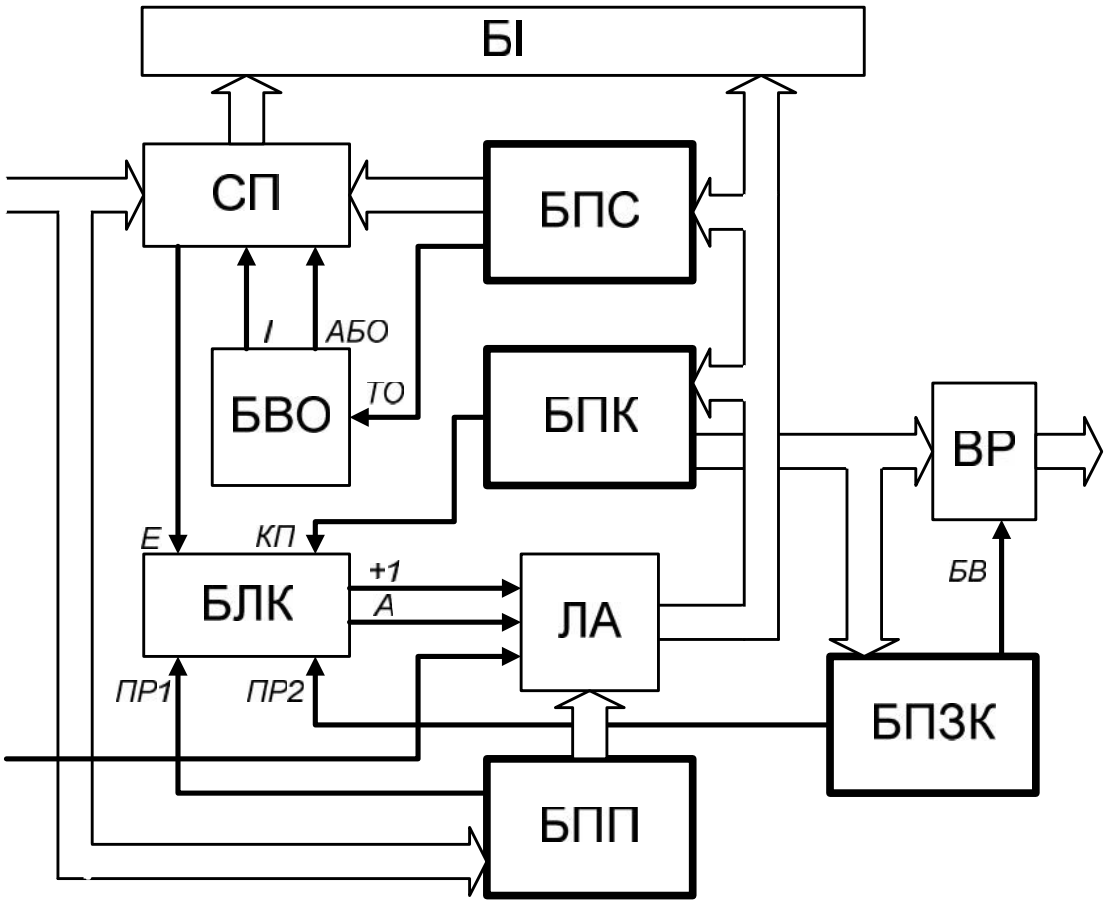

Рисунок 2.1 – Структура керуючого автомату паралельної дії

Архітектура ПЛІС-контролера S4C показана на рисунку 2.2 і складається з двох каналів, кожний з яких містить функціональний модуль і діагностичну систему, яка, при виникненні помилок, блокує роботу модулю, тобто ядро логіки, у якому виявлено помилку, і переходить до незворотного захисного стану. Слід зазначити, що такий алгоритм роботи є обов’язковим для забезпечення вимог безпеки СКЗ.

Безпечність ПЛІС-контролера S4C досягається за рахунок: застосування архітектури з двома дубльованими каналами; тестового самодіагностування апаратної частини і цілісності конфігурації ПЛІС;

функціональної діагностики під час формування керуючих впливів; використання захищених протоколів обміну даними.

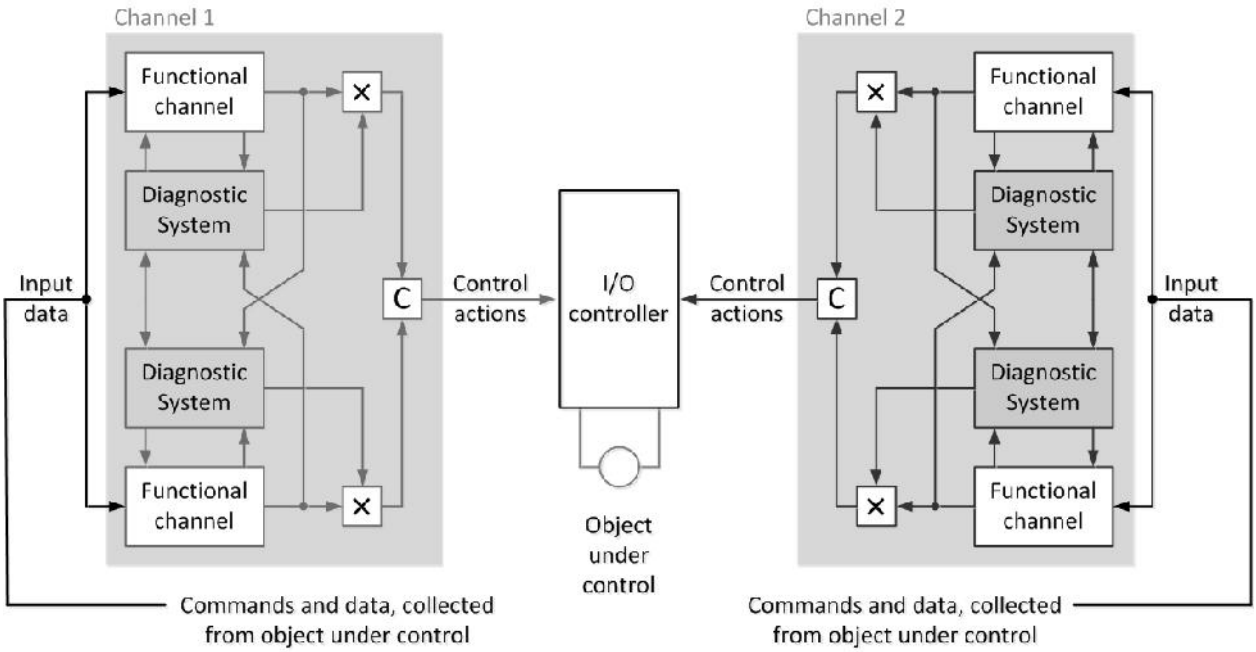

Рисунок 2.2 – Архітектура безпечного ПЛІС-контролера S4C

Зовнішній вигляд промислового зразка ПЛІС-контролера S4C реалізованого для монтажу у касети показана на рисунку 2.3.

Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд безпечного ПЛІС-контролера S4C

2.2 Автомат паралельної дії із нечіткою логікою

Класичні автомати паралельної дії, а також ПЛК паралельної дії, що побудовані на їх базі, призначені, переважно, для побудови систем керування технологічними процесами і агрегатами дискретної циклічної дії. Енергетичні мережі, структуру яких розглянуто у першому розділі, не підпадають під цю класифікацію. Таким чином постає необхідність формування вдосконаленої технології паралельного логічного керування в нечіткій формі на базі автомата паралельної дії. Такі автомати отримали назву автомата паралельної дії із нечіткою логікою (АПДН).

Перш ніж переходити до формування структури АПДН, необхідно задатись наступним питанням: чи є необхідність у застосуванні даного математичного апарату для побудови таких структур. Для цього є щонайменше дві причини:

- наявність невизначеності вхідних величин;
- природна паралельність процедури нечіткого логічного висновку.

Наявність невизначеності вхідних величин. Як відомо, задачі прийняття рішення в енергетиці розв’язуються в умовах неповноти і невизначеності зовнішньої інформації, що призводить до отримання неточних результатів. У відповідності до [9] невизначеність має місце, якщо універсальна множина складається більше ніж з однієї точки. Якщо для цих елементів множини задані відповідні вірогідності, то має місце вірогіднісна характеристика; якщо відомі тільки граничні елементи – інтервальна невизначеність; якщо задати для кожного елемента множини відповідну степінь приналежності – нечіткість. Саме невизначеність виникає, наприклад, у процесі вимірювання параметрів, що визначають технологічні процеси в енергетиці. Такі невизначеності можуть мати різну природу: неточність (або погрішність) вимірювальних приладів; наявність різних значень при формуванні множинних вимірювань; опосередкованість вимірювань, наприклад через розосередженість за параметром або за територією; тощо. У

таких випадках для класичних систем логічного керування застосовують детермінізацію (наприклад методом статистичного усереднення), таким чином або втрачаючи частину даних, або просто її ігноруючи.

Природна паралельність процедури нечіткого логічного висновку. Така природна паралельність дозволяє достатньо просто інтегрувати елементи реалізації нечіткої логіки до структури класичних автоматів паралельної дії, таким чином розширивши їхню функціональність і напрямки застосування.

2.2.1 Способи розкриття невизначеності та особливості застосування різних типів функцій приналежності нечітких множин

Завдання вибору раціональних рішень в енергетиці вирішуються в умовах неповноти та невизначеності зовнішньої інформації, що призводить до отримання неточних результатів. Відомо, що в складних системах енергетики співвідношення між складовими помилки для встановлених режимів становлять [1]:

- через неточність вихідних даних – 82-84%;
- через неточність моделі – 14-15%;
- через неточність методу – 2-3%.

Внаслідок такої великої частки похибки вихідних даних, виникає і похибка для цільової функції, що призводить до значної зони невизначеності при виборі оптимального рішення.

Неточність моделей об’єктів викликається нееквівалентністю рішень системних багаторівневих ієрархічних моделей і застосовуваних на практиці окремих локальних завдань. Неточність моделей може виникати через неправильно проведену декомпозицію загального завдання, зайву ідеалізацію моделі, розрив істотних зв’язків, лінеаризацію, дискретизацію, порушення допущень, прийнятих при виведенні рівнянь. Через велику складність об’єкта, істотної нелінійності, труднощів формалізації, наявності різних суб’єктивних критеріїв і обмежень можуть застосовуватися нечіткі моделі.

Неточність методу пояснюється такими причинами, як похибки розрахункових процедур, нечіткість (неоднозначність) природної мови (лінгвістична невизначеність) і мови уявлення правил у системах експертного типу.

Методи прийняття рішень в умовах великих помилок у вихідних даних можна розділити на дві основні групи:

- придушення впливу неточної інформації з подальшим використанням звичайних детермінованих алгоритмів;

- перехід за наявності неточної інформації на спеціальні алгоритми (стохастичні, нечіткі, інтервальні).

Для першого напряму характерним є застосування різних методів фільтрації та згладжування вихідної інформації, усереднення та зважування даних. Застосовуються також методи відновлення відсутніх даних, інтерполяції та екстраполяції, робасні алгоритми.

При вирішенні завдань у детермінованій постановці зі зростанням складності та розмірності моделі виникають великі проблеми зі стійкістю оптимізаційних завдань. Подання низки обмежень як нечітких дає можливість отримувати стійке рішення за умов похибки інформації та нечіткості обмежень із зазначенням зниження ступеня допустимості цього режиму, тобто як функції приналежності. Постановка завдання в нечіткій формі також значно знижує можливість отримання несумісних рішень при розрахунку та оптимізації. Принциповим недоліком детермінованих моделей систем є відсутність ефективних методів порівняння різних можливих моделей за призначенням моделі, її похибки та адекватності припущень, закладених в її основу. Побудова моделей у межах нечіткого підходу дозволяє порівняти моделі і надавати точний зміст таким поняттям як "значний" і "незначний". З’являється можливість формалізації неточних знань про предметну область, внесення в модель відомостей про неповноту інформації.

При використанні стохастичних моделей виникає цілий ряд складнощів, пов’язаних з труднощами отримання щільностей розподілу ймовірностей для параметрів, нерегулярними явищами при вирішенні стохастичних диференціальних рівнянь.

Останнім часом підвищений інтерес викликає застосування апарату теорії нечітких множин під час вирішення багатокритеріальних завдань оптимізації. За рахунок обліку умов існування моделей, самих особливостей мінімаксних операцій Заде за допомогою апарату нечітких множин вдається досягти робастності алгоритмів, тобто їх нечутливості до невеликих відхилень від припущень.

Нечітка підмножина A універсальної множини X характеризується функцією приналежності μ_A:X→[0, 1], яка ставить у відповідність кожному елементу особливості різних типів функцій приналежності нечітких множин $x \in X$ число $\mu_A(x)$ інтервалу [0, 1], що характеризує ступінь приналежності елемента x підмножині A. Тобто, функція приналежності (membership function) – це функція, яка кожному значенню змінної (у межах кожної множини) ставить у відповідність значення в інтервалі від 0 до 1.

Тоді нечітка множина $A = \{x, «_A(x)\}$ визначається як сукупність упорядкованих пар, складених з елементів x універсальної множини X та відповідних ступенів належності $\mu_A(x)$.

При цьому для опису нечітких множин Л. Заде ввів математичну систему позначень. Так для кінцевої нечіткої множини A з функцією приналежності $\mu_A(x)$ Заде ввів таке позначення на основному множині $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$

$$A = \frac{«_A(x_1)}{x_1} + \frac{«_A(x_2)}{x_2} + \ldots + \frac{«_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{«_A(x_i)}{x_i}. \qquad (2.1)$$

Слід зазначити, що дробова риса та знак плюс фігурують лише формально, вони в даному випадку не мають того ж значення, що й у

класичній математиці. Іноді замість знака розподілу пишуть також похилу межу «/», як у виразі

$$A = \sum_{i=1}^{n} «_A(x_i) / x_i . \qquad (2.2)$$

Багато нечітких множин описуються за допомогою вербально вимовних функцій приналежності. Ця обставина є характерною щонайменше для сьогоднішнього становища нечіткої логіки. Найчастіше можна зустріти нечіткі множини, які мають якийсь із чотирьох основних типів функцій приналежності [27].

Функція приналежності першого типу є монотонно зростаючою: зі збільшенням значень x також зростає функція приналежності або вона постійна (рисунок 2.4).

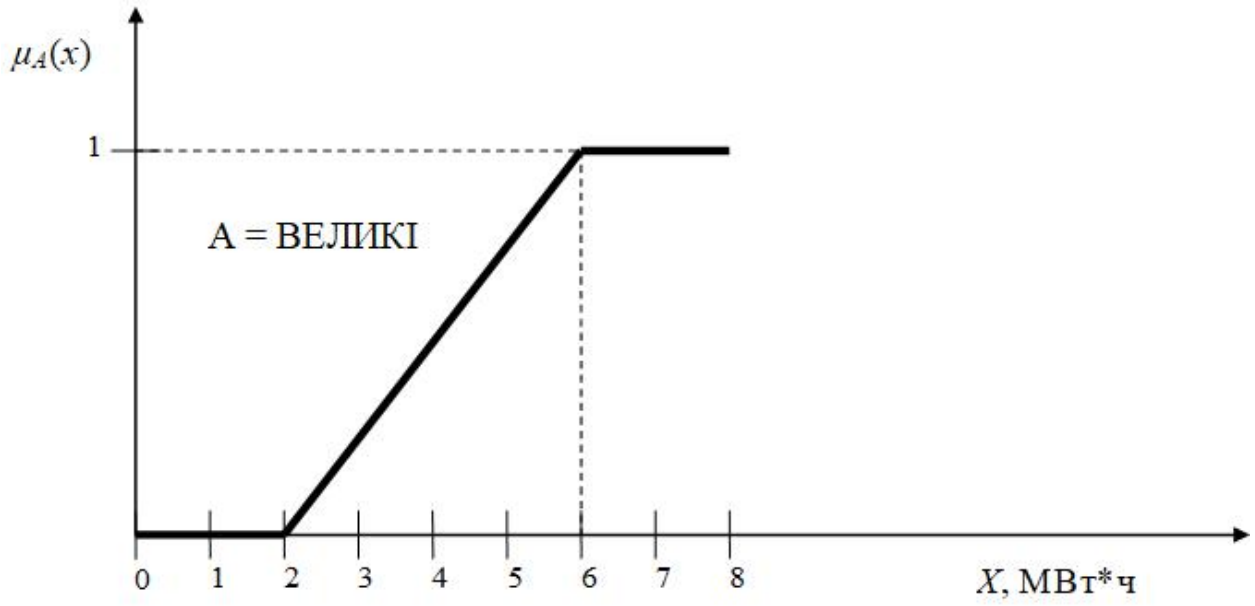

Рисунок 2.4 – Нечітка множина А з монотонно зростаючою лінійною функцією приналежності $\mu_A(x)$

Приклад на рисунку 2.4 показує положення функції належності μ_A нечіткої множини А = ВЕЛИКІ на основній множині (основному інтервалі) для втрат електроенергії у якійсь абстрактній мережі [0; 8].

Функція приналежності другого типу є монотонно спадаючою: зі зростанням х функція приналежності зменшується або залишається рівною. В даному випадку значення μ_A на кінцях інтервалу часто рівні константам при значеннях що збільшуються і при значеннях, що зменшуються, що називається власне «областю нечіткості» при середніх значеннях х.

На рисунку 2.5 показана функція приналежності нечіткої множини А = МАЛЕНЬКІ на основній множині (основному інтервалі) [0; 8] для втрат електроенергії у певній мережі.

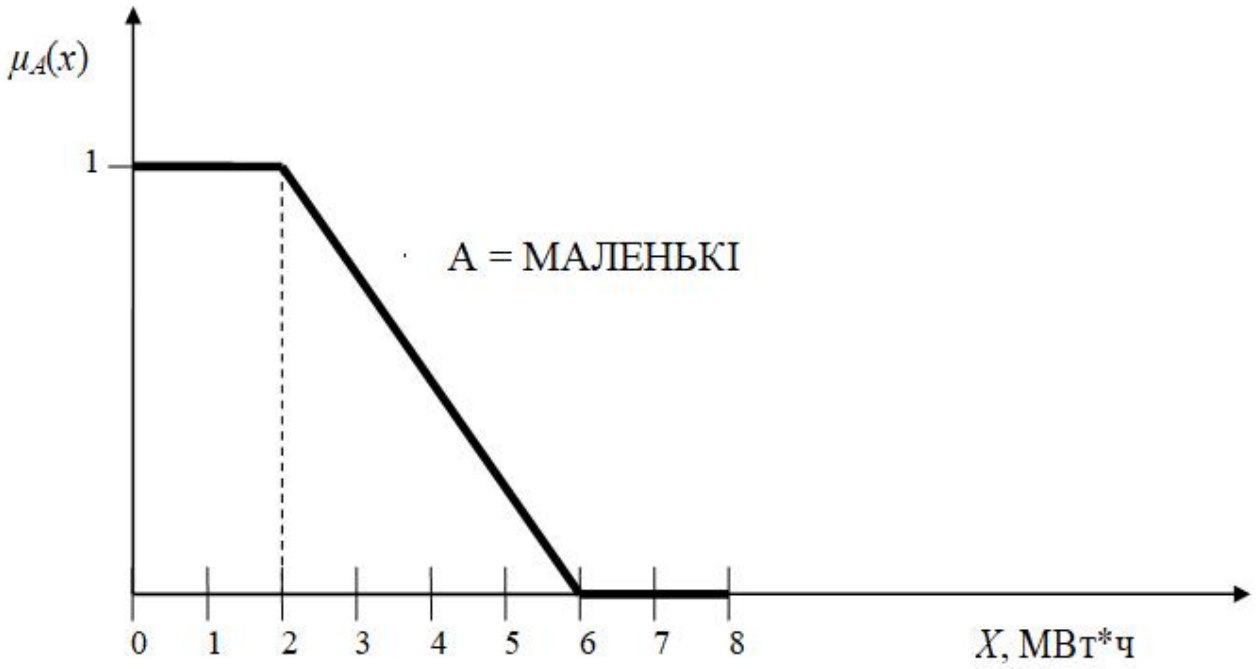

Рисунок 2.5 – Нечітка множина А з монотонно спадаючою лінійною функцією приналежності $\mu_A(x)$

Функція власності третього типу монотонно зростає, досягаючи певної величини х з постійним значенням $\mu_A(x) = 1$, а потім монотонно зменшується. Іншими словами, можна сказати, що чим більша відстань від максимуму, тим

менша приналежність до нечіткої множини. На рисунку 2.6 представлений цей тип функції приналежності нечіткої множини А = БЛИЗЬКО 4 МВт * год на основній множині (основному інтервалі) [0; 8] для втрат електроенергії в певній абстрактній енергомережі. При лінійному характері функції приналежності така нечітка множина називається нечіткою множиною з трикутною формою графіка μ_A.

Рисунок 2.6 – Нечітка множина А з трикутною функцією приналежності $\mu_A(x)$

Функція приналежності четвертого типу схожа на функцію приналежності третього типу. Вона приймає своє максимальне значення не тільки в одній точці, а й на ділянці основного інтервалу. До цього типу належать такі нечіткі множини, що в середній області визначені детерміновано (повна приналежність), а при наближенні до меж інтервалу зростає нечіткість (тобто зменшується належність). У якості прикладу на рисунку 2.7 проілюстровано функцію належності нечіткої множини А = СЕРЕДНЄ на основній множині (основному інтервалі) [0; 8] для втрат електроенергії у певній абстрактній мережі. При лінійному характері функції приналежності нечітка множина такого типу називається трапецієподібною.

Найбільш поширеним у нечітких математичних моделях типом функції власності є трикутний тип. Трикутні функції приналежності, своєю чергою, поділяються на симетричні та асиметричні.

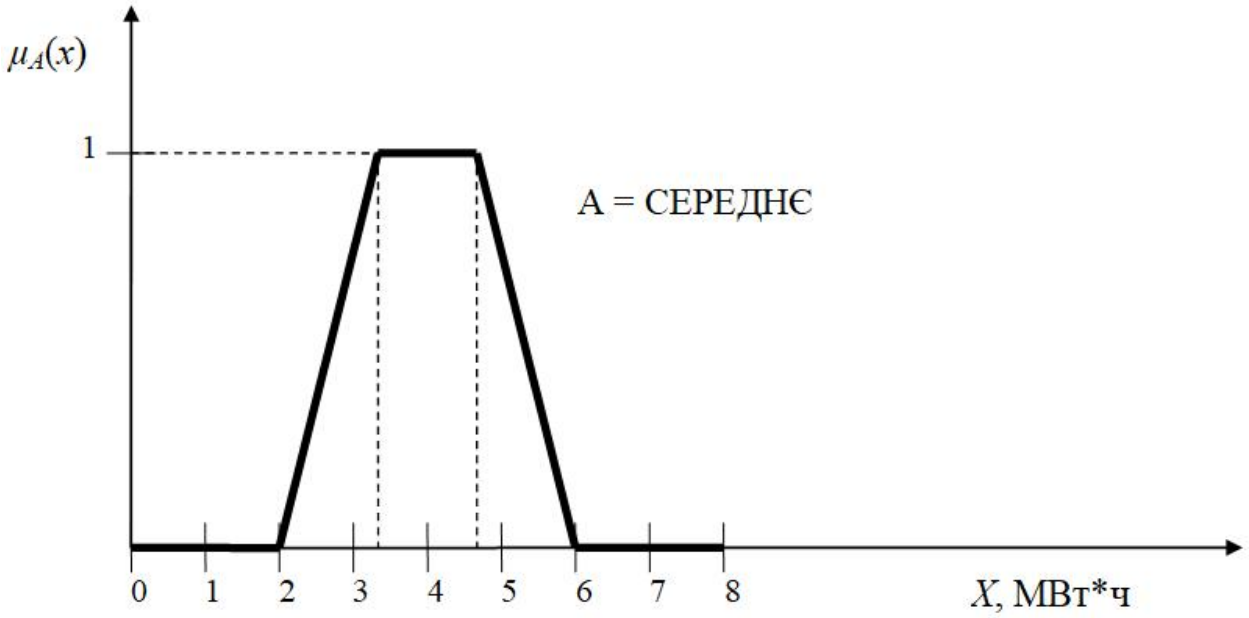

Рисунок 2.7 – Нечітка множина А з трапецієподібною функцією приналежності $\mu_A(x)$

2.2.2 Синтез структури АПДН

У загальному вигляді процес формування вихідних команд АПДН має складатись із трьох етапів:

- процедури фазифікації вхідних величин;
- процедури нечіткого логічного висновку;
- процедури дефазифікації (формування команд керування).

Останній етап відсутній, якщо вихідні дані можуть бути представлені у нечіткій формі. Аналогічно, якщо вхідна інформація представлена у нечіткій формі, то перший етап також не виконується.

Перш ніж безпосередньо переходити до синтезу АПДН обов’язково слід згадати пристрій для керування машиною для лиття під тиском [2],

спрощена структура якого показана на рисунку 2.8. На вказаній структурі блоки дискримінаторів Д1 і Д2 виконують фазифікацію із приведенням вхідних аналогових сигналів (Вхід 1, Вхід 2) до трьох рівнів – більше (>), норма (н), менше (<), блок логічної обробки (БЛО) жорстко задає алгоритм функціонування технологічного процесу, а вихідні регулятори Р1-Р3, у залежності від комбінацій вхідних сигналів – більше, норма або менше, формують сигнали керування обладнанням (Вихід 1 - Вихід 3), тобто фактично виконують функції дефазифікаторів.

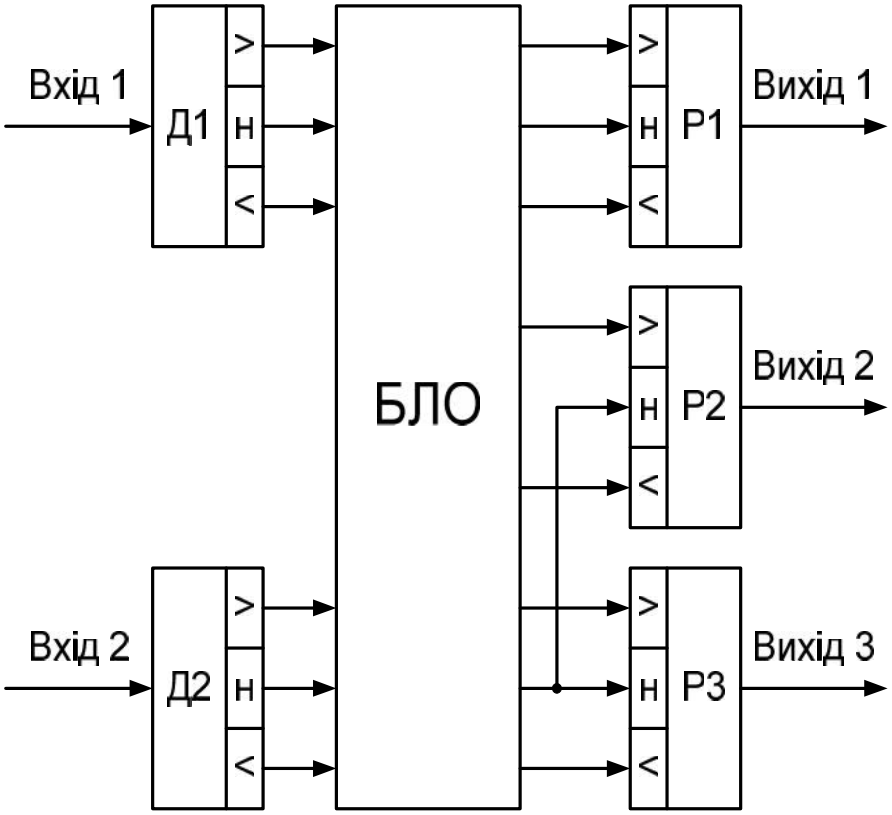

Рисунок 2.8 – Спрощена структура прототипу АПДН

Фактично показана структура являє собою автомат паралельної дії, що побудований на жорсткій логіці і нечіткою логікою керування, та був створений для керування конкретним обладнанням технологічної лінії лиття роторів електродвигунів. Він не передбачав програмування і був реалізований на дискретних елементах, що обмежило його застосування

тільки обладнанням згаданого класу. Але принципи, закладені при його побудові дозволяють вважати його прообразом для АПДН.

Для синтезу структури АПДН розглянемо можливі варіанти вхідних даних автомата. В загальному вигляді вони можуть бути трьох типів:

- аналогові;
- цифрові двійкові;
- цифрові фазифіковані.

Аналогічні типи даних можуть бути реалізовані і на виходах автомата. Слід зауважити, що вхідні дані в аналоговій формі – явище достатньо розповсюджене, в той час як формування аналогових вихідних сигналів – задача достатньо специфічна.

Якщо розглянути цифрові фазифіковані і нефазифіковані дані, то можна дійти висновку, що двійкові дані можна представити як нечіткі, але із значенням μ, що приймає лише два значення (0 і 1), у той час як для нечіткої форми значення μ може приймати будь-яке значення у діапазоні від 0 до 1, наприклад для трикутної форми (рисунок 2.9). У той же час цифрові дані після процедури фазифікації являють собою звичайний двійковий код певної розрядності – від двох і більше, що залежить від необхідної точності фазифікації (при однорозрядній фазифікації ми знову ж таки отримуємо звичайне двійкове число). Таким чином можна зробити висновок, що при синтезі структури АПДН обидва типи вхідних даних можуть бути представлені як набір двійкових чисел.

Аналогічні міркування можна застосувати і при розгляді аналогових даних на вході автомата: перед їх обробкою обов’язковою є процедура перетворення їх у цифрову форму. Тобто і аналогові дані у результаті аналого-цифрового перетворення будуть представлені паралельним цифровим двійковим кодом. Таким чином, вхідні дані для АПДН всіх згаданих типів фактично являють собою паралельний двійковий код певної розрядності. Так само і вихідні дані всіх типів можуть бути представлені аналогічним кодом.

Ще одне із важливих питань, що виникає при синтезі АПДН, полягає у наступному: яка кількість вхідних величин у нечіткій формі може бути оброблена автоматом і скільки вихідних команд керування може бути ним сформовано? Насправді теоретично кількість входів-виходів логічного керуючого автомата паралельної дії є необмеженою, отже і кількість входів АПДН також є необмеженою. Але виходячи із досвіду реалізації контролерів паралельної дії (у тому числі промислових зразків) можна стверджувати, що кількість входів-виходів, фактично, обмежена складністю технічної реалізації і процедурою складання керуючої циклограми.

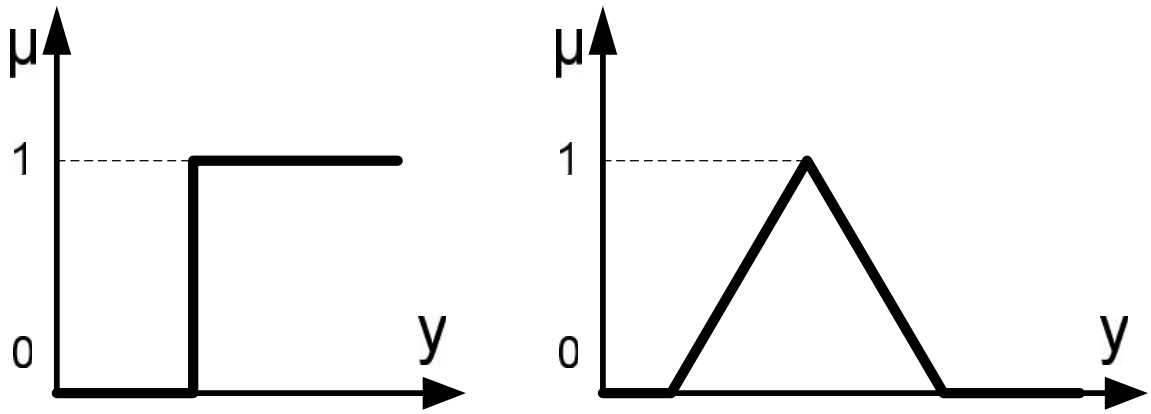

Рисунок 2.9 – Загальний вигляд функції μ для даних у двійковій і нечіткій формі

Із вищевказаного можна зробити наступний висновок: класична структура ЛК АПД, що є базовою для реалізації інформаційної технології паралельного логічного керування (наприклад [3]), може бути взята за основу при синтезі структури АПДН.

Виходячи із принципів функціонування ЛКАПД і задач, що ставляться перед АПДН, до структури ЛКАПД внесені наступні зміни:

- виключено блоки БПЗК і ВР, що забезпечували невидачу заборонених комбінацій вихідних команд керування, оскільки питання

безпечності керування на даному етапі ще не розглядаються і не обґрунтовуються;

- виключено БІ, оскільки видача інформації про поточний стан вхідних даних не є актуальною.

Інші блоки присутні в структурі АПДН, хоча і дещо змінюють своє функціональне призначення. Узагальнена структура АПДН показана на рисунку 2.10.

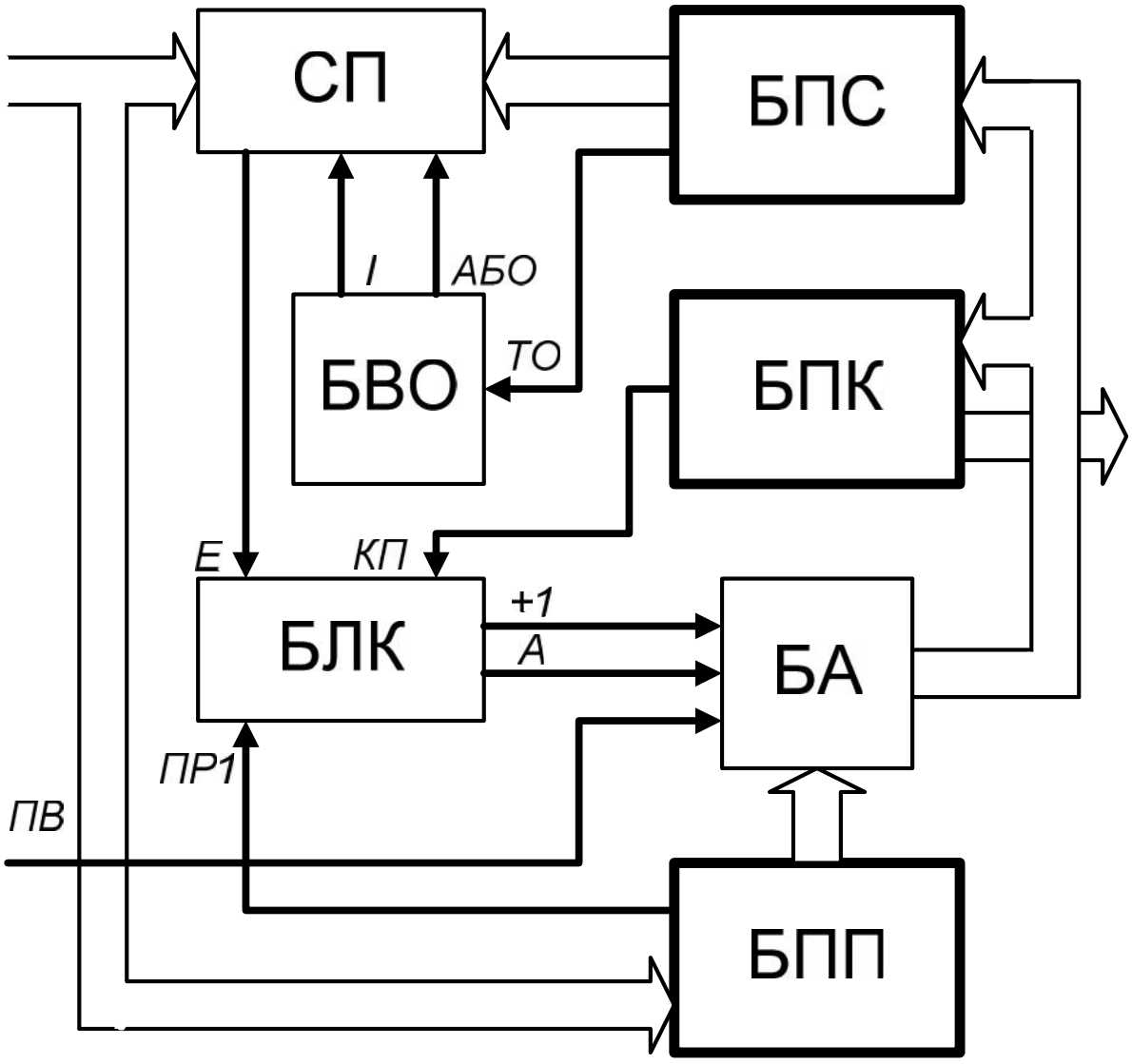

Рисунок 2.10 – Структура АПДН

Робота АПДН відрізняється від роботи ЛКА ПД, наступними особливостями:

- БПП втрачає свою основну функціональність із формування адреси переходу до підпрограми, а фактично, разом з БПК, виконує функції зберігання таблиці формування нечіткого логічного висновку;
- БПС може містити лише фрагменти послідовного виконання команд, якщо в них є необхідність. Якщо така детермінована послідовність відсутня, то БПС виключається із структури;
- блок адресації (БА) виконує ті ж функції, що і ЛА в ЛКА ПД, але тепер його основною функцією є формування нечіткого логічного висновку разом з БПП, а не послідовного відпрацювання рядків підпрограм, разом з БПС.

3 HDL-МОДЕЛЬ КЕРУЮЧОГО АВТОМАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ ДІЇ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ

3.1 HDL-модель класичного ЛКА ПД

На рисунку 3.1 показано HDL-модель класичного ЛКА ПД, що дозволяє виконати перехід від абстрактних моделей до практичного втілення цих моделей інструментальними засобами розробки, що входять до складу систем проектування технічних засобів на базі кристалів ПЛІС.

Розглянемо функціональні блоки і компоненти блоків, що складають HDL-модель із наведенням призначення і виконуваних функцій [3, 23].

Функціональний блок *bps:_bps* – блок пам’яті станів, забезпечує зберігання комбінації станів детермінованих входів, яка є диною "дозволеною" для включення відповідної кінцевої комбінації механізмів. Містить *q*-розрядний вхід адреси *adr[q..1]*, *k*-розрядний вихід двобітних даних *vec_Ai[1..k][1..2]* і двійковий вихід *ot* (тип операції) на якому формується сигнал логічного «0» або «1» у залежності від типу логічної операції, що має виконуватись схемою порівняння.

Функціональний блок *bpk:_bpk* – блок пам’яті команд, забезпечує зберігання команд керування технологічним обладнанням. Містить *q*-розрядний вхід адреси *adr[q..1]*, *m*-розрядний вихід даних *vec_c[1..m]* і двійковий вихід *endsp* (кінець підпрограми), що приймає значення логічної «1», при наявності у векторі даних ознаки кінця підпрограми.

Функціональний блок *bpp:_bpp* – блок пам’яті переходів, забезпечує зберігання і видачу адреси початку підпрограм. Містить *u*-розрядний вхід даних *vec_b[1..u]*, *q*-розрядний вихід адреси початку підпрограми *sp_adr[q..1]* і вихід *int1* (аварійне переривання 1) на якому формується сигнал логічної «1» у випадку наявності у вхідному векторі *vec_b[1..u]* ознаки аварійного переривання.

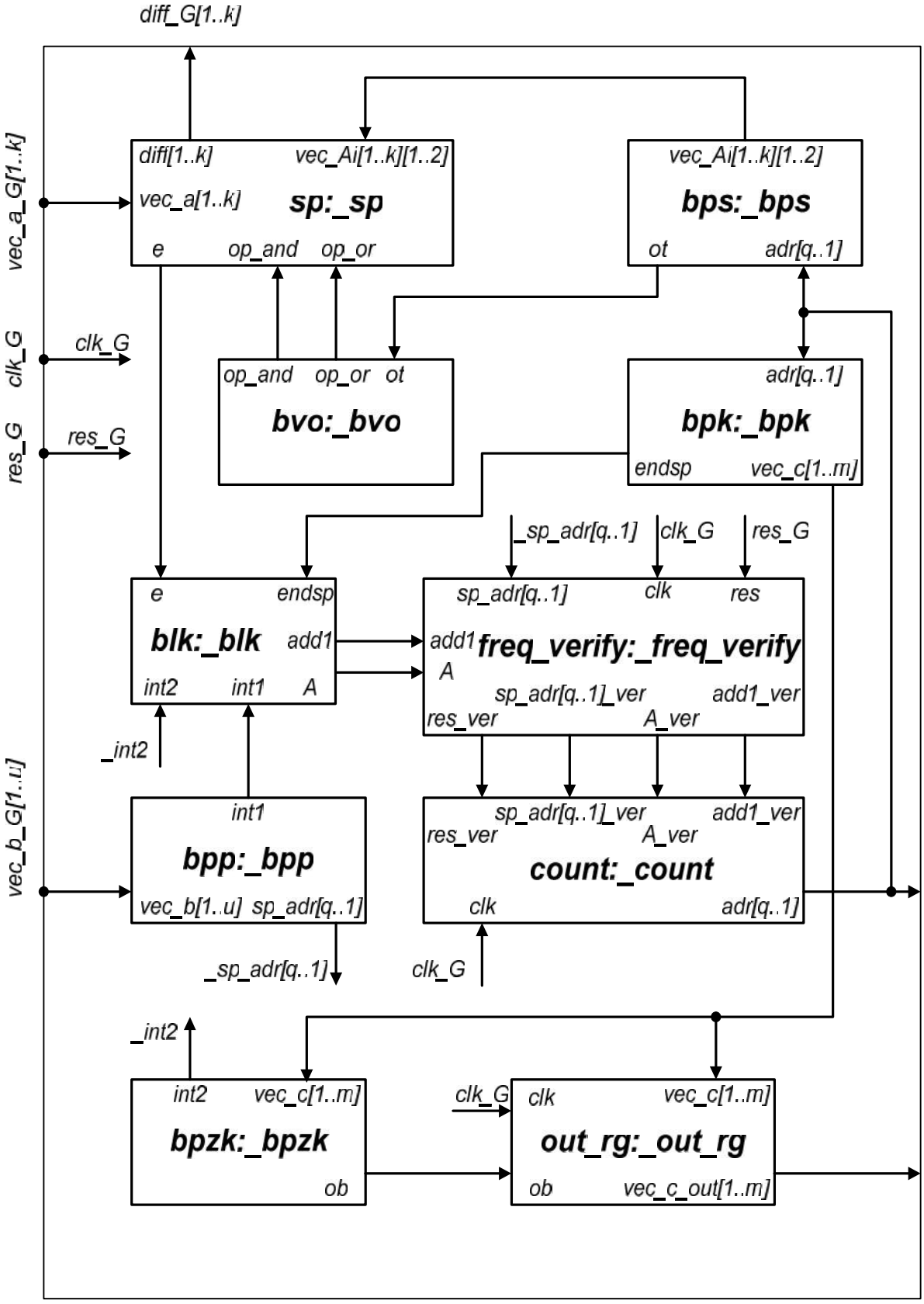

Рисунок 3.1 – HDL-модель керуючого автомата паралельної дії

Функціональний блок *bpzk:_bpzk* – блок пам’яті заборонених комбінацій, забезпечує зберігання заборонених комбінацій команд керування технологічним обладнанням. Містить *m*-розрядний вхід даних і виходи *int2* (аварійне переривання 2) і *ob* (блокування виходу), на яких формуються сигнали керування суміжними блоками при наявності на вході *vec_c[1..m]* забороненої комбінації команд керування.

Функціональний блок *sp:_sp* – забезпечує логічне порівняння сигналів на *k*-розрядних входах даних *vec_a[1..k]* і *vec_Ai[1..k][1..2]*, при цьому у залежності від сигналів на входах *op_and* і *op_or* (операція «І», операція «АБО») сигнал логічної «1» на виході *e* (еквівалентність) формується або при порозрядному співпадінні сигналів векторів *vec_a[1..k]* і *vec_Ai[1..k][1..2]*, або при співпадінні сигналів хоча б у одному із розрядів вхідних векторів. Сигнали на *k*-розрядному виході *diff[1..k]* формуються як результат вказаної операції.

Функціональний блок *bvo:_bvo* – забезпечує формування команд вибору операції для блоку логічного порівняння, містить двійковий вхід *ot* (тип операції) і двійкові виходи *op_and* (операція «І») і *op_or* (операція «АБО»).

Функціональний блок *count:_count* – лічильник адреси, забезпечує адресацію блоків пам’яті станів і команд. Містить *q*-розрядні вхід *sp_adr_ver[q..1]* (адреса переходу) і вихід *adr[q..1]*, вхід синхронізації *clk*, входи керування *res_ver* (команда скиду), *A_ver* (команда паралельного завантаження) і *add1_ver* (команда додавання одиниці).

Функціональний блок *blk:_blk* – блок логічного керування, забезпечує керування лічильником адреси у залежності від сигналів, що сформовані суміжними функціональними блоками логічного автомата. Містить логічні входи *e* (еквівалентність), *endsp* (кінець підпрограми), *int1*, *int2* (аварійне переривання 1 і 2), а також виходи керування лічильником – *A* (паралельне завантаження адреси) і *add1* (додавання одиниці).

Функціональний блок *out_rg:_out_rg* – вихідний регістр, призначений для фіксації і передачі команд керування від блоку пам’яті команд на виконавчі механізми технологічного агрегату, а також блокування такої передачі у випадку наявності забороненої комбінації цих команд. Містить *m*-розрядний вхід *vec_c[1..m]* і вихід *vec_c_out[1..m]* даних, вхід синхронізації *clk* і вхід блокування виходу *ob*.

Функціональний блок *freq_verify:_freq_verify* – забезпечує 8-ми кратну перевірку достовірності сигналів блоку логічного керування, сигналу скиду логічного контролера і адреси підпрограм. Структурна схема блоку показана на рисунку 3.2.

Основними складовими компонентами блоку *freq_verify:_freq_verify* є:

- компонент *freq_verify_reg:reg1* – (*q+3*)-розрядний паралельний регістр, який містить входи *clock* (сигнал синхронізації), *enable* (вхід дозволу запису інформації), а також інформаційні входи *data[q+2..0]* і виходи *q[q+2..0]*. При цьому три молодші розряди регістру використовуються для зберігання сигналів *res, A, add1* (скиду, адреси переходу, додавання одиниці), а *q* розрядів для зберігання адреси переходу *sp_adr[q..1]*;

- компонент *freq_verify_reg2:reg2* – (*q+3*)-и розрядний паралельний регістр, призначений для фіксації і тимчасового зберігання достовірної комбінації сигналів *res, A, add1* і *sp_adr[q..1]*. Конструктивно аналогічний компоненту *freq_verify_reg:reg1*, на відміну від якого містить додатковий вхід *sclr_A* – вхід асинхронного скиду 1-го розряду регістра (розряду команди *A_ver*). На старших *q* розрядах формуються достовірні сигнали *sp_adr_ver[q..1]*, а з молодшого розряду *q0* знімається достовірна команда *res_ver* – скиду контролера;

- компонент *freq_verify_comparator:comparator* – схема порівняння, забезпечує фіксацію зміни станів вхідних сигналів. Містить інформаційні входи *dataa[q+2..0]*, *datab[q+2..0]* і один інверсний вихід *aeb*, на якому формується сигнал логічної одиниці при нееквівалентності сигналів *dataa[q+2..0]* і *datab[q+2..0]*;

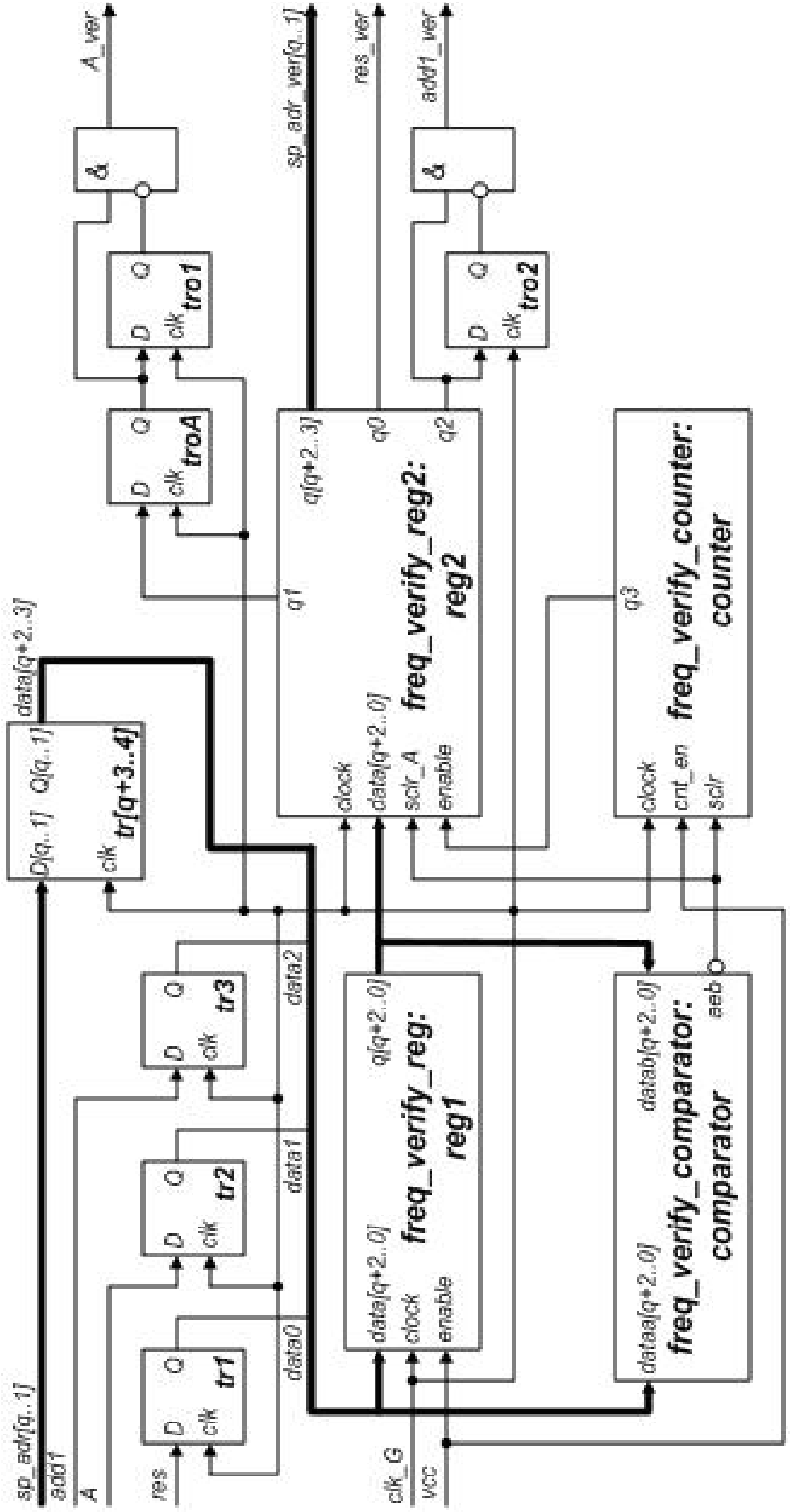

Рисунок 3.2 – Структурна схема функціонального блоку *freq_verify: _freq_verify*

- компонент *freq_verify_counter:counter* – 4-х розрядний лічильник, який містить входи *clock* (сигнал синхронізації), *cnt_en* (вхід дозволу роботи), *sclr* (вхід синхронного скиду лічильника), а також вихід *q3*, на якому формується сигнал логічної «1» у випадку, якщо протягом певного інтервалу часу вхідні сигнали *data[q+2..0]* були незмінними;

- компонент *tr (tr1-tr[q+3])* – синхронні D-тригери призначені для синхронізації подання сигналів *res, A, add1* і *sp_adr [q..1]* із глобальним сигналом *clk_G*. Містить входи даних *D* і синхронізації *clk*, а також вихід *Q*;

- компонент *tro (tro1, tro2)* – синхронні D-тригери, які сумісно з логічними елементами «І» формують достовірні команди *ver_A* і *ver_add1* довжиною в один період глобального сигналу синхронізації *clk_G*. Побудова компонентів *tro* аналогічна компонентам *tr*;

- компонент *troA* – синхронний D-тригер, конструктивно аналогічний компоненту *tr* і призначений для затримки видачі команди *A_ver* на один період глобального сигналу синхронізації *clk_G*.

3.2 HDL-модель АПДН

Виходячи з тих змін, що зазнала структура АПДН у порівнянні зі структурою ЛКПА ПД, та враховуючи певні зміни у функціональності деяких блоків, синтезовано HDL-модель автомату паралельної дії з нечіткою логікою, що представлена на рисунку 3.3

По аналогії з HDL-моделлю ЛКА ПД розглянемо функціональні блоки і компоненти цих блоків, та вкажемо їх призначення і зміни у виконуваних функціях.

Функціональний блок *bpk:_bpk* – блок пам’яті команд, забезпечує зберігання команд керування технологічним обладнанням. Містить *q*-розрядний вхід адреси *adr[q..1]*, *m*-розрядний вихід даних *vec_c[1..m]* і двійковий вихід *endsp* (кінець підпрограми). Призначення цього блоку таке ж, як і в однойменного блоку ЛКА ПД.

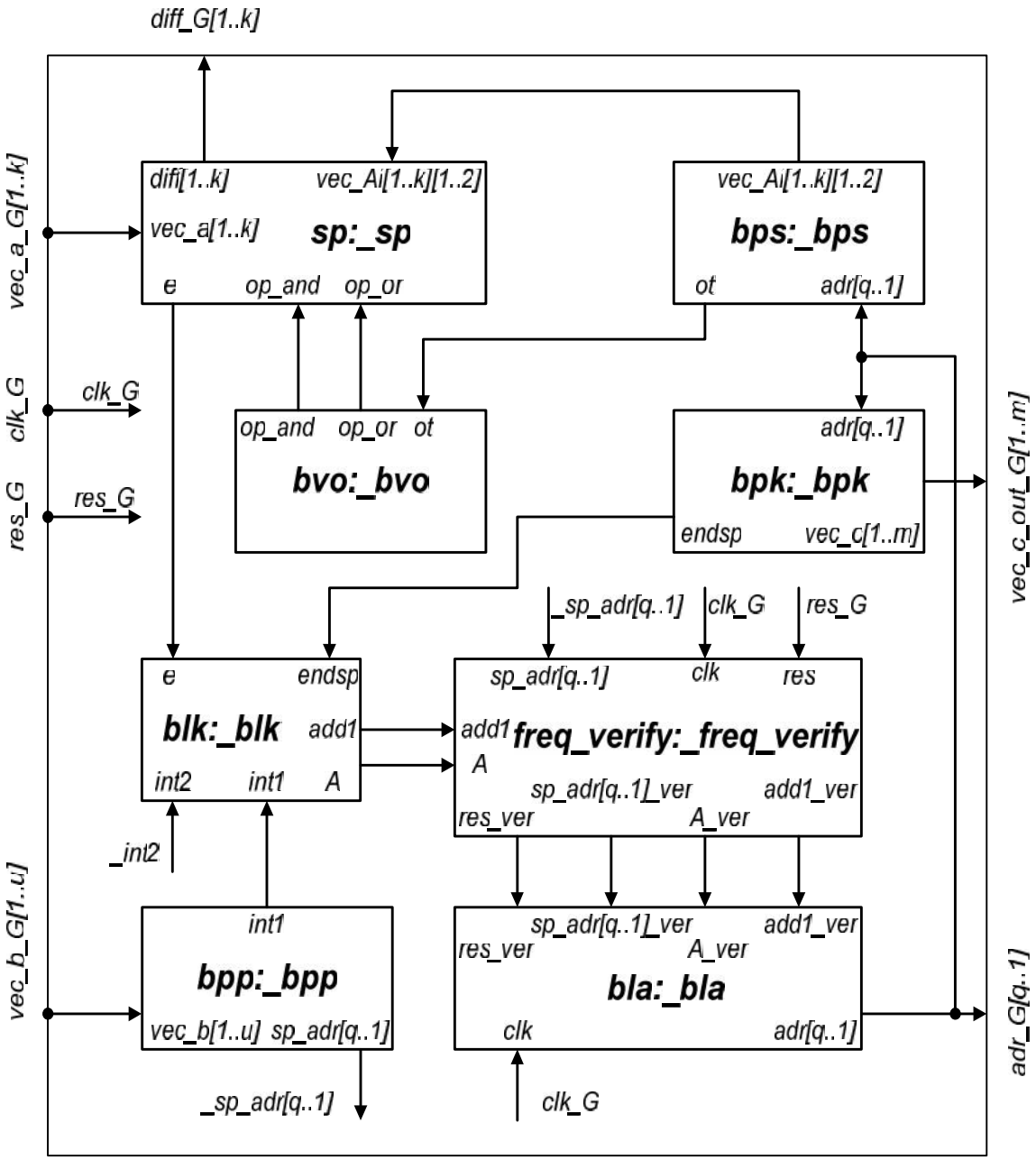

Рисунок 3.3 – HDL-модель АПДН

Функціональний блок *bps:_bps* – блок пам’яті станів, призначений для зберігання комбінації станів детермінованих входів. Якщо така детермінована послідовність відсутня, то блок *bps:_bps* може бути виключений з HDL-моделі Містить *q*-розрядний вхід адреси *adr[q..1]*, *k*-розрядний вихід двобітних даних *vec_Ai[1..k][1..2]* і двійковий вихід *ot* (тип операції) Загальне функціональне призначення цього блоку повністю збігається з аналогічним блоком моделі ЛКА ПД.

Функціональний блок *bpp:_bpp* – блок пам’яті переходів, на відміну від однойменного блоку ЛКА ПД разом з блоком *bpk:_bpk* виконує функції зберігання таблиці формування нечіткого логічного висновку. Містить *u*-розрядний вхід даних *vec_b[1..u]*, *q*-розрядний вихід адреси початку підпрограми (адреси функції виконання нечіткого логічного висновку) *sp_adr[q..1]* і вихід *int1* (аварійне переривання 1) на якому формується сигнал логічної «1» у випадку наявності у вхідному векторі *vec_b[1..u]* ознаки аварійного переривання.

Функціональний блок *sp:_sp* – виконує аналогічні функції моделі ЛКА ПД – забезпечує логічне порівняння сигналів на *k*-розрядних входах даних *vec_a[1..k]* і *vec_Ai[1..k][1..2]*. Сигнали на *k*-розрядному виході *diff[1..k]* формуються як результат операції логічного порівняння.

Функціональний блок *bvo:_bvo* – забезпечує формування команд вибору операції для блоку логічного порівняння (операція «І», чи «АБО»).

Функціональний блок *bla:_bla* – блок адресації, забезпечує адресацію блоків пам’яті станів і команд. Функціональне призначення цього блоку збігається з призначенням блоку *count:_count* ЛКА ПД, але логічне навантаження стає дещо іншим: формування нечіткого логічного висновку разом з *bpp:_bpp*, а не послідовного відпрацювання рядків підпрограм, разом з *bps:_bps*.

Функціональний блок *blk:_blk* – блок логічного керування, забезпечує керування блоком адресації *bla:_bla* у залежності від сигналів, що сформовані іншими функціональними блоками АПДН. Містить логічні входи *e*, *endsp*, *int1*, *int2*, а також виходи *A* і *add1*, призначення яких розглянуто у HDL-моделі ЛКА ПД.

Функціональний блок *freq_verify:_freq_verify* – забезпечує 8-ми кратну перевірку достовірності сигналів блоку логічного керування, сигналу скиду логічного контролера і адреси підпрограм. Внутрішня структура і функціональне призначення цього блоку аналогічні структурі і призначенню аналогічного блоку ЛКА ПД.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи було виконано аналіз існуючих і перспективних сучасних технологій побудови енергетичних систем та наведено загальну характеристику пошкоджень електричних мереж і методів їх пошуку.

Розглянуто архітектуру і принцип дії класичних керуючих автоматів паралельної дії, наведено способи розкриття невизначеності та особливості застосування різних типів функцій приналежності нечітких множин. Виконано синтез структури автомату паралельної дії з нечіткою логікою.

Розглянуто HDL-модель класичного логічного керуючого автомату паралельної дії. На базі синтезованої структури АПДН розроблено HDL-модель автомату паралельної дії з нечіткою логікою.

Таким чином завдання, що поставлені в кваліфікаційній роботі успішно виконані, синтезовані структурна схема і HDL-модель АПДН дозволяють перейти до етапу практичної реалізації промислового зразка контролера паралельної дії на ПЛІС, і проведення випробувань в умовах конкретної енергетичної мережі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Алтунин, А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях [Текст]: монография / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин. – Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2000. – 352 с.

2. А. с. 1026946 СССР, МКИЗ В 22 D 17/32. Устройство управления машиной для литья под давлением [Текст] / Кострица В. Г., Фурман И. А (СССР). – №3425477/22-02 ; заявл. 20.01.82 ; опубл. 07.07.83, Бюл. № 25.

3. Бовчалюк, С. Я. Новая информационная технология логического управления в энергетике и на транспорте [Текст] / С. Я. Бовчалюк // Системи управління, навігації та зв’язку. – К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2007. – Вип. 3 – С. 47-51.

4. Бовчалюк, С. Я. Развитие архитектуры ПЛК параллельного действия: от абстрактной модели параллельного автомата, до инженерной реализации безопасного ПЛИС-контроллера [Текст] / С. Я. Бовчалюк, И. А. Фурман, М. Л. Малиновский // Енергетика та комп’ютерно-інтегровані технології в АПК. 2016. – №. 2 (5). – С. 62-66.

5. Дементьев, В. С. Как определить место повреждения в силовом кабеле [Текст] / В. С.Дементьев. – М.: Энергия, 1980. – 74 с.

6. Дорофеев, В. В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России [Текст] / В. В. Дорофеев, А. А. Макаров // Энергоэксперт. – 2009 – №4 (15) – С. 28-34.

7. Измерение производительности умных сетей в европе [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://leg.co.ua/stati/izmerenie-proizvoditelnosti-umnyh-setey-v-evrope.html

8. Инициатива «цифровые подстанции» для модернизации сетевой инфраструктуры [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://leg.co.ua/stati/iniciativa-cifrovye-podstancii-dlya-modernizacii-setevoy-infrastruktury.html

9. Кандель, А. Нечеткие множества, нечеткая алгебра, нечеткая статистика [Текст] / А. Кандель, У. Дж. Байатт // Труды америк. о-ва инженеров-радиоэлектроников. – 1978. – Т. 66, № 12. – С. 37-61.

10. Ледин, С. С. Интеллектуальные сети Smart Grid – будущее российской энергетики [Текст] / С. С. Ледин // Автоматизация & IT в энергетике. 2010. – №11 (16). – С. 4-8.

11. Лурье, А. И. Электрические измерения в сетях сильного тока [Текст] / А. И. Лурье. – Л.-М.: Госэнергоиздат, 1948. – 383 с.

12. Любацький, А. В. Реалізація елементів інтелектуальних енергетичних систем [Текст] / А. В. Любацький, С. Я. Бовчалюк, О. М. Піскарьов // Проблеми інформатизації. Тези доповідей дев’ятої міжнародної науково-технічної конференції (18-19 листопада 2021 року), Том 1. – 2021. – С. 127

13. Повышение энергоэффективности сети с помощью датчиков [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://leg.co.ua/stati/povyshenie-energoeffektivnosti-seti-s-pomoschyu-datchikov.html

14. Сиротенко, М. А. Синтез оптимального размещения средств повышения эффективности электроснабжения при неопределенности исходной информации [Текст] / М. А. Сиротенко, С. А. Тимчук, С. Я. Бовчалюк. – Харьков, 2018. – 116 с.

15. Тенденции, повлияющие на энергетику в 2020 году [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://leg.co.ua/stati/3-tendencii-povliyayuschie-na-energetiku-v-2020-godu.html

16. Тимчук, С. А. Модели и методы поиска оптимальной структуры сети электроснабжения при нечетко заданных целях: монография [Текст] / С. А. Тимчук. – Харьков: Факт, 2010. – 219с.

17. Тимчук, С. А. Синтез оптимальной структуры распределительных электрических сетей при неопределенности исходной информации : монография [Текст] / С. А. Тимчук, Н. М. Черемисин. – Харьков: ООО «В деле» 2016. – 270 с.

18. Титов, Н. Н. Формирование ведомственной системы сбора метеоданных в условиях эффективного оптового рынка электроэнергии [Текст] / Н. Н. Титов, Н. М. Черемисин, П. Д. Лежнюк и др. – Праці інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. Енергетичні ринки: перехід до нової моделі ринку двосторонніх контрактів і балансуючого ринку. –К: 2009. – С.41-48.

19. Ульянов, С. А. Короткие замыкания в электрических системах [Текст] / С. А. Ульянов. – 4-е изд. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1952. – 280 с.

20. Фурман, И. А. Концепция, методы и средства моделирования на ПЛИС контроллеров и процессоров с параллельной архитектурой [Текст] / И. А. Фурман, В. А. Краснобаев, М. Л. Малиновский [и др.] // Автомобильный транспорт: Сб. научных трудов, вып. 16. – Харьков, 2005. – С. 338–341.

21. Фурман, И. А. Программируемые контролеры для систем управления. Часть 1. Архитектура и технология применения. [Текст] / И. А. Фурман, Г. И. Загарий, Н. О. Ковзель, В. И. Поддубняк, А. И. Стасюк. – Харьков: ХФИ «Транспорт Украины»; – Харьков: Издательство «Регион-информ», 2001. – 316 с.

22. Фурман, И. А., Совершенствование математической модели и архитектуры логических управляющих автоматов параллельного действия [Текст] / И. А. Фурман, С. Я. Бовчалюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. –№3 (59). – С. 72–76.

23. Фурман, І. О. HDL-модель програмованого логічного керуючого автомата паралельної дії [Текст] // І. О. Фурман, С. Я. Бовчалюк // Радіоелектронні і комп’ютерні системи. – 2007. – №6 (25). – С. 202–205.

24. Что такое «умные» распределительные сети завтрашнего дня? [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://leg.co.ua/stati/chto-takoe-umnye-raspredelitelnye-seti-zavtrashnego-dnya.html

25. Шилин, А. Н. Приборы контроля и диагностики в электроэнергетике: учеб. пособие [Текст] / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, Н. С. Артюшенко [и др.] : ВолгГТУ. – Волгоград, – 2017. – 132 с.

26. Шкура, В П. Об аварийности в 2010 году и показатели надежности в электрических сетях 6-150 кВ энергоснабжающих компаний, которые входят в состав НАК «ЭКУ» [Текст] // Электрические сети и системы. – 2011 – № 2. – С. 32-42.

27. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future. [Текст] – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.

28. PACIS – цифровая система мониторинга, защиты и управления подстанции [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://leg.co.ua/stati/podstancii/pacis-cifrovaya-sistema-monitoringa-zaschity-i-upravleniya-podstancii.html

29. NYPA разрабатывает технологию для отслеживания отказов электросети [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://leg.co.ua/stati/nypa-razrabatyvaet-tehnologiyu-dlya-otslezhivaniya-otkazov-elektroseti.html

30. Furman, Ilya. Development and study of technological visual programming of logic control problems [Текст] / Ilya Furman, Stanislav Bovchaliuk, Alexander Allashev, Aleksey Piskarev // Eastern-European Journal of Enterprise technologies, – 2017. – № 6/2 (90). –P. 23–31.