

УДК 621.311

О.С. Яндульський, О.В. Тимохін, А.О. Тимохіна

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЧНОГО ЧАСТОТНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

The paper considers the frequency load shedding of an electric power system. The objective of this paper is to enhance the structure and algorithms of frequency load shedding-1 (AUFLS-1) using cutting-edge technologies, namely Wide Area Measurement System. We model the operation of the system of complex power supply when various emergencies in the Power Factory software occur. We aim at revealing the fact of the voltage corner reaction on the emergency occurrence and elaborating the algorithm of detecting the emergency by speed of voltage corner change. The result and novelty of this research is that we propose how to upgrade the system AUFLS-1 by introducing the additional starting block reacting to the speed of the voltage corner change which increases the speed of AUFLS-1 system operation. As a result the system AUFLS-1 starts up not only by achieving “frequency” set point but also by analyzing the speed of voltage corner change.

### Вступ

Відомо, що для безперебійного постачання електроенергії споживачам необхідна надійна робота електроенергетичної системи (ЕЕС), яка забезпечується стійкістю, під якою розуміється здатність системи відновлювати нормальний режим роботи після великого або малого збурення режиму системи. Система автоматичного частотного розвантаження (АЧР) призначена для збереження стійкості ЕЕС через обмеження розвитку й припинення аварійних режимів у енергосистемі. Найважливішим її завданням є запобігання загальносистемним аваріям, що супроводжуються порушенням електропостачання споживачів на значній території [1–4].

Особливістю існуючої системи АЧР є те, що вона спрацює після зниження частоти нижче уставки спрацювання (49 Гц) [5, 6], на досягнення якої витрачається додатковий час.

### Постановка задачі

Метою роботи є підвищення ефективності роботи системи АЧР, зокрема її швидкодії. Для цього запропоновано підхід до системи АЧР, який, на відміну від існуючого підходу, разом із контролем частоти для оцінювання стану режиму ЕЕС використовує зміну кута напруги.

### Розроблення методу підвищення ефективності роботи систем АЧР

Як дослідну схему було вибрано тестову 14-вузлову схему IEEE 14 Bus System (рис. 1), оскільки вона чітко відображає поведінку енер-

госистеми в умовах поставленої задачі. Моделювання проводилося у програмному пакеті Digsilent Power Factory [7].

Для аналізу роботи мережі було вибрано варіанти аварійних ситуацій, що наведені в табл. 1. Згідно з [5], тривалість короткого замикання (КЗ), яка складається з максимального часу спрацювання релейного захисту і часу спрацювання вимикача, для мереж напругою 110, 220 кВ покладалася 140 мс. У процесі досліджень було визначено відхилення частоти та кута напруги для різних пошкоджень (деякі результати наведено в табл. 1).

При аналізі отриманих залежностей кута напруги від часу було встановлено, що для всіх випадків пошкоджень спостерігається значна зміна кута напруги у перші 2 с після початку аварії (рис. 2). За цей час досягається максимальне амплітудне значення кута напруги [7–9].

У випадку КЗ на лінії електропередачі (ЛЕП) відхилення частоти відбувається майже миттєво, але максимальна величина досягає лише 0,18 %, тобто є неістотною.

У випадку відключення/накиду навантаження або відключення генератора частота змінюється монотонно. При цьому зміна частоти за 1 с становить 0,012 %, а зміна кута – 20 %, тобто зміна частоти є значно повільнішою.

Таким чином, використання зміни кута напруги для оцінки режимів електроенергетичної системи дає можливість швидше відреагувати на аварію в мережі, особливо у перші 2 с після початку аварії, що є основою для створення більш швидкодіючої системи протиаварійної автоматики (ПА).

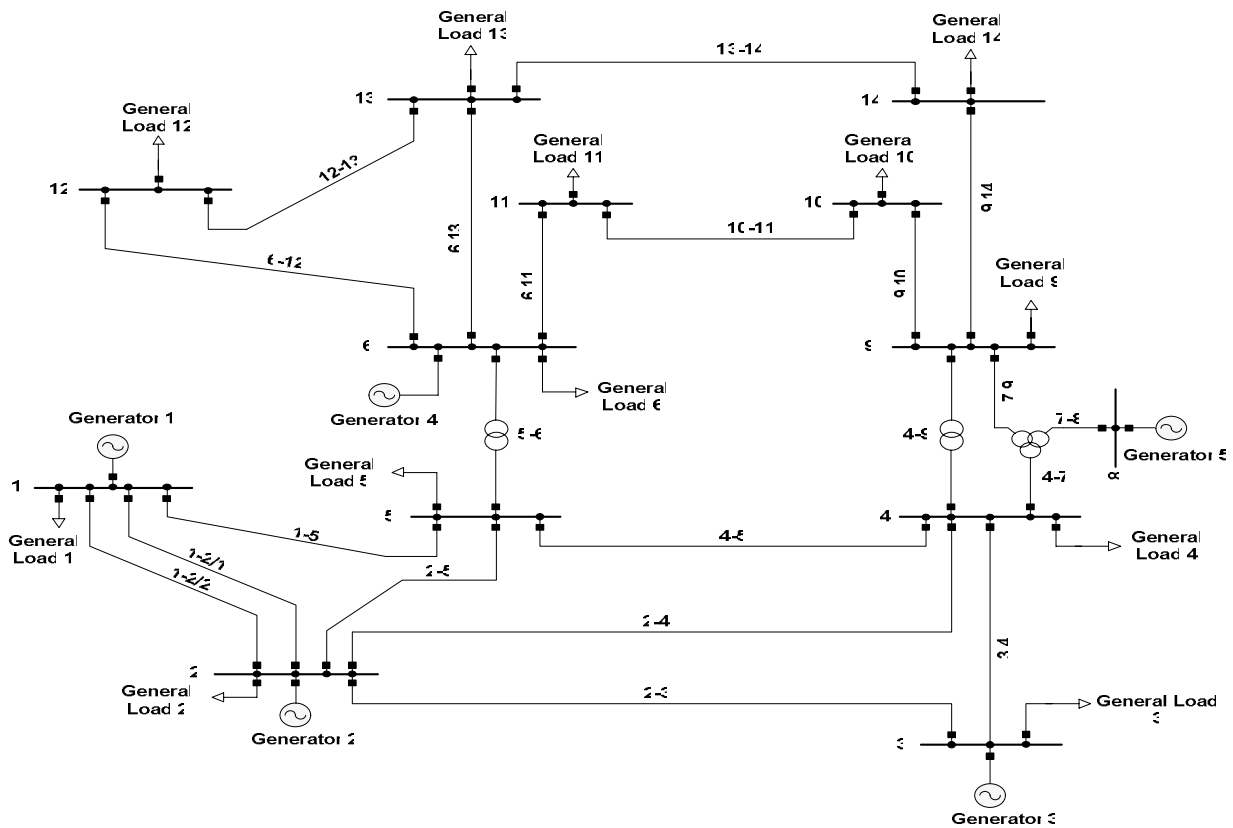


Рис. 1. Досліджувана 14-вузлова тестова схема IEEE

Таблиця 1. Варіанти сценаріїв аварійних ситуацій

Елемент схеми	Пошкодження	Відхилення на шині 2	
		$\Delta f, \%$	$\Delta \delta, \%$
ЛЕП 2-4	1-фазне КЗ фази А з подальшим вимкненням КЗ через 140 мс	0,04	11,7
	2-фазне КЗ фаз АВ з подальшим вимкненням КЗ через 140 мс	0,06	7,3
ЛЕП 2-3	3-фазне КЗ з подальшим вимкненням КЗ через 140 мс	0,04	12,18
	Вимкнення лінії	2,312	7,47
ЛЕП 4-5	2-фазне КЗ фаз АВ з подальшим вимкненням КЗ через 140 мс	0,18	52,94
Трансформатор 4-9	Вимкнення трансформатора	0,04	6,3
Навантаження 1	Відключення навантаження	6,42	40,54
	Накид навантаження	5,4	18,08
Генератор Г1	Відключення генератора	16,89	50
Генератор Г2	Відключення генератора	29,927	85,03

При дослідженні залежності швидкості зміни кута напруги від часу було також встановлено, що при виникненні аварії або накиду навантаження швидкість зміни кута (рис. 3) досягає свого максимального значення за модулем, що достатньо для спрацювання ПА. У випадку КЗ виникають 2 піки: перший – у момент виникнення КЗ, другий – у момент ліквідації КЗ пристроями релейного захисту і автоматики. Блок-схема нової системи АЧР зображена на рис. 4, 5.

Запропонований метод дає можливість визначити момент накиду навантаження в перші мілісекунди його виникнення і прийняти рішення про частотне розвантаження мережі для усунення зниження частоти в мережі. Також метод передбачає усунення помилкових спрацювань АЧР-1 завдяки "розпізнаванню" аварій у мережі, а саме спрацювання відбувається при аваріях, які призводять до зниження частоти в мережі.

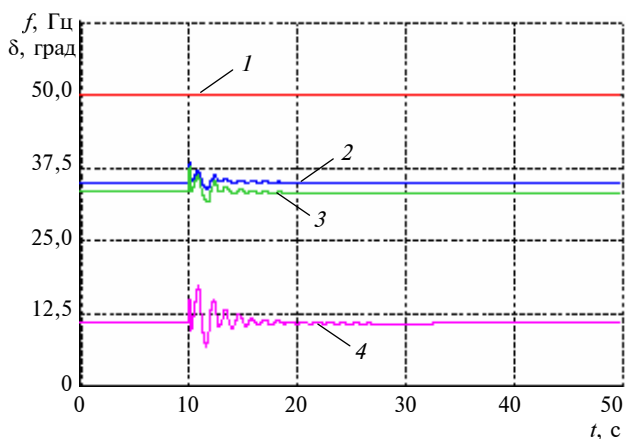


Рис. 2. 2-фазне КЗ на ЛЕП 4-5 у момент часу 10 с: 1 – шина 2 (частота); 2 – шина 1 (кут напруги); 3 – шина 2 (кут напруги); 4 – шина 4 (кут напруги)

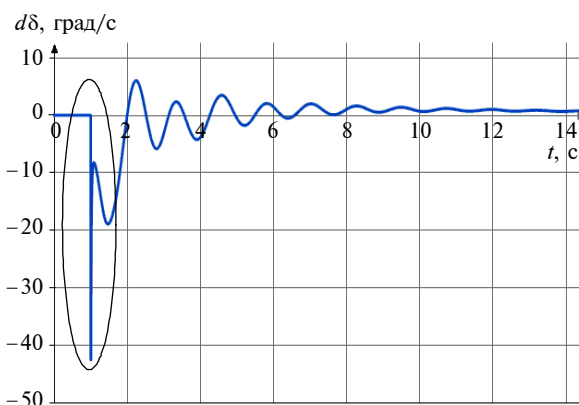


Рис. 3. Швидкість зміни кута напруги у випадку накиду навантаження на шині 3 на величину  $70,65 + j5,7$  МВА

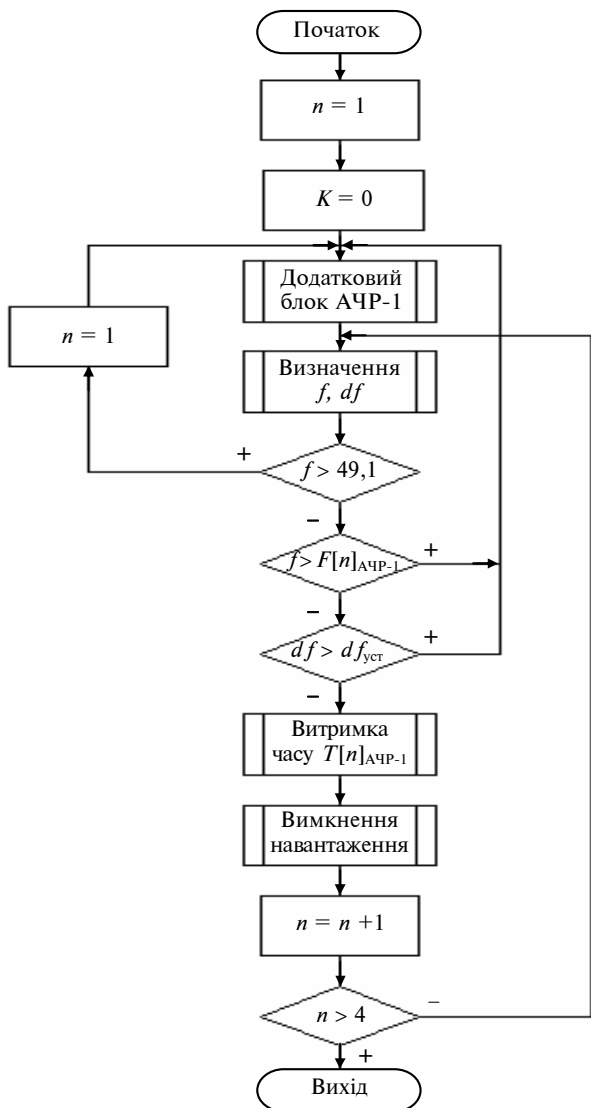


Рис. 4. Блок-схема алгоритму АЧР-1 з використанням залежності зміни кута напруги від часу

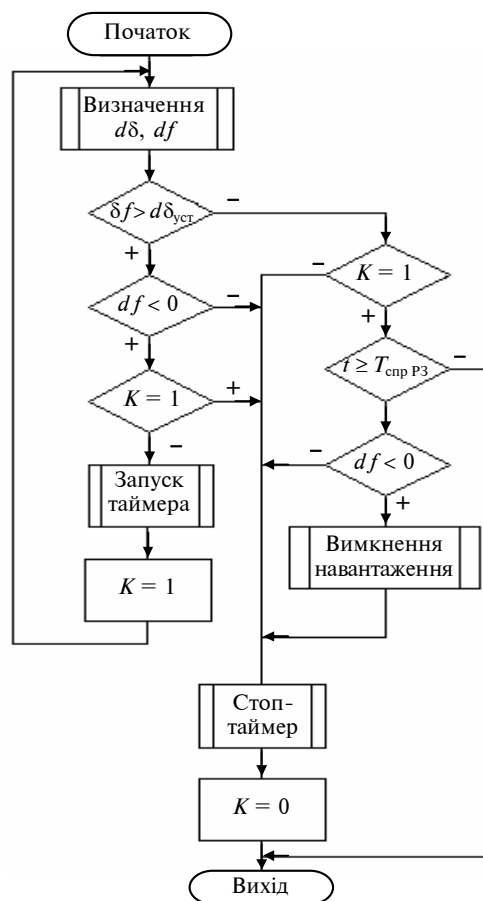


Рис. 5. Блок-схема алгоритму додаткового блока АЧР-1 з використанням залежності зміни кута напруги від часу

Відповідно до запропонованого методу розроблено алгоритм роботи АЧР-1 (рис. 4, 5) моделі додаткового блока АЧР-1 (рис. 6). Як модель існуючої АЧР було використано модель чотириступеневої АЧР з бібліотеки Power Factory. В той же час на дослідній 14-вузловій тес-

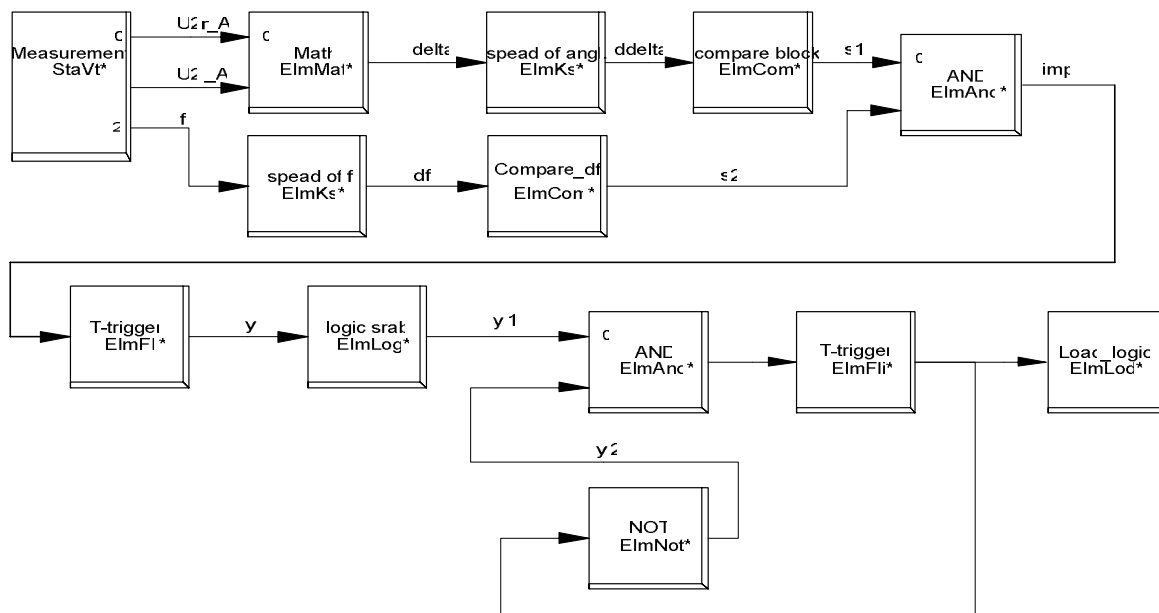


Рис. 6. Модель додаткового блока АЧР-1, що реагує на швидкість зміни кута напруги

товій схемі IEEE було встановлено додаткові шини напругою 10 кВ для подальшого встановлення на них пристроїв АЧР.

У моделі використовуються такі блоки:

1. Measurement – блок, що являє собою ТН, на виході якого отримуються значення напруги фази А (активна та реактивна складові), а також значення частоти.

2. Math – блок обчислення значення кута напруги.

3. Speed of angle – блок розрахунку швидкості зміни кута напруги.

4. Compare block – блок порівняння отриманого сигналу з величиною уставки спрацювання  $K_{уст}$ , що розраховується за формулою

$$K_{уст} = V\delta_{min} \cdot K_{зап},$$

де  $V\delta_{min} = 40$  – мінімальне значення швидкості зміни кута напруги, що було отримане в досліді;  $K_{зап} = 0,5$  – коефіцієнт запасу спрацювання. Отже,  $K_{уст} = 20$ .

5. Speed off – блок розрахунку швидкості зміни частоти.

6. Compare\_df – блок порівняння. Якщо знак швидкості зміни частоти від'ємний, то на виході формується логічна одиниця, у випадку додатного знаку швидкості зміни частоти формується логічний нуль.

7. Блок AND забезпечує спрацювання додаткового блока АЧР-1 лише у випадках, що призводять до зниження частоти.

8. T-trigger – забезпечення фіксації появи сигналу накиду навантаження.

9. Logic grab – логіка спрацювання. Цей блок виконує функцію перевірки характеру аварії: у випадку КЗ на виході цього блока буде логічний нуль, а при накиді навантаження чи аварії – логічна одиниця.

10. Наступні три блоки NOT, AND, T-trigger використовуються для фіксації сигналу накиду навантаження чи аварії.

11. Load2\_1 – блок вимкнення вимикача. Коли на вхід цього блока приходиться логічна одиниця, то відбувається вимкнення.

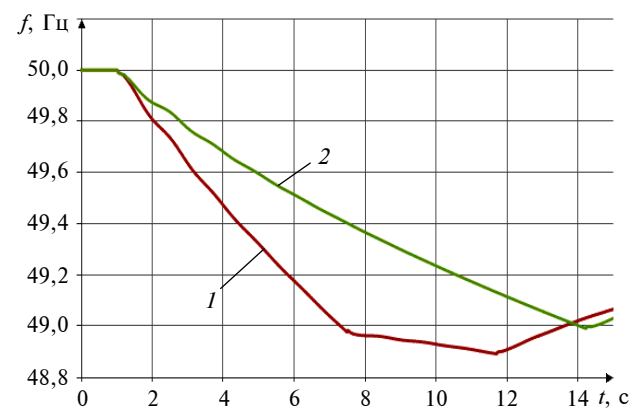


Рис. 7. Робота існуючої системи АЧР-1 (1) і АЧР-1 з використанням блока швидкості зміни кута напруги (2) у випадку накиду навантаження на шину 3 на величину  $70,65 + j5,7$  МВА

На рис. 7 наведено залежності зміни частоти від часу при використанні існуючої АЧР-1

Таблиця 2. Зміна частот

Вид пошкодження	$f_{t=100\text{ с, Гц, без АЧР}}$	$f_{t=100\text{ с, Гц, з АЧР}}$	$f_{t=100\text{ с, Гц, удосконалена АЧР}}$	Величина накиду навантаження		Час досягнення уставки спрацювання АЧР, с	
				$P, \text{ МВт}$	$Q, \text{ МВА}$	Існуюча АЧР	Удосконалена АЧР
Накид навантаження на шині 3	46,566	49,919	49,832	42,3	2,85	11,62	0,1611
Накид навантаження на шині 1	46,506	49,941	49,910	50	15	12,85	0,1546
Накид навантаження на шині 3	43,446	49,934	49,734	70,65	5,7	7	0,1561
Вимкнення генератора Г2	9,507	49,538	50	–	–	1	0,704
2-фазне КЗ на ЛЕП 2-4	$f_{\min} = 49,828$	$f_{\min} = 49,828$	$f_{\min} = 49,828$	–	–	–	–

і АЧР-1 з використанням блока, що реагує на швидкість зміни кута напруги [7]; деякі результати порівняння роботи систем наведені в табл. 2.

### Висновки

Проведені дослідження та їх аналіз показали працездатність та ефективність запропонованого методу. Проведені дослідження, при накиді навантаження у вузлі 3 на  $(70,65 + j5,7)$  МВА, показали, що уставка спрацювання діючої АЧР-1

досягається через 7 с після початку аварії (див. рис. 7), в той час як АЧР на основі розробленої методики спрацьовувала через 0,1561 с.

АЧР на основі розробленого методу є більш швидкодіючою за рахунок виявлення аварії в перші мілісекунди після її появи та запуску додаткового блока АЧР-1, внаслідок чого зменшується швидкість або припиняється зниження частоти.

Отримані результати є основою для подальших досліджень АЧР та розроблення методики вбору уставок спрацювання.

1. *Совалов С.А., Семенов В.А.* Противоаварийное управление в энергосистемах – М.: Энергоиздат, 1988. – 416 с.
2. *Семенов В.А.* Противоаварийная автоматика в ЕЭС России. – М.: НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”, 2004. – 108 с.
3. *Козис В.Л., Овчаренко Н.И.* Автоматика электроэнергетических систем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 490 с.
4. *Голота А.Д.* Автоматика в электроэнергетических системах – К.: Вища школа, 2006. – 365 с.
5. *Гловацкий В.Г., Пономарев И.В.* Релейная защита и автоматика распределительных сетей [Электронная версия 1.0]. – 2003. – 471 с.
6. *Рабинович Р.С.* Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
7. *Тимохіна А.О.* Підвищення ефективності протиаварійної автоматики енергосистеми: Дипл. робота: 8.05070106; К.: НТУУ “КПІ”. – К., 2012. – 136 с.
8. *Ленчевський Є.А.* Дослідження методів з удосконалення управління об’єднаними енергосистемами // Проблеми загальної енергетики. – 2007. – № 15. – С. 34–40.
9. *К.Е. Martin*, “Phasor Measurement Systems in Western North America”, in Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems, Cigre. Cheboksary, September 9–13, 2007, pp. 26–32.