

## ПРИСКОРЕННЯ ДІЇ АВТОМАТИЧНОГО ЧАСТОТНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ШВИДКІСТЬ ЗНИЖЕННЯ ЧАСТОТИ

**В.М. Авраменко**, докт.техн.наук, **Н.Т. Юнєєва**, канд.техн.наук, **Т.М. Гурєєва**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. e-mail: [avr@ied.org.ua](mailto:avr@ied.org.ua)

*Досліджено, що використання пристроїв, які вимірюють швидкість зниження частоти, забезпечує виконання вимог щодо аварійних коливань частоти. Обґрунтовано умови налаштування автоматики, яка використовує такі пристрої. За результатами виконаного аналізу НЕК «Укренерго» розробило нову редакцію ГКД «Застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах. Правила.», де висвітлено питання практичної реалізації АЧР-Ш. Ефективність АЧР-Ш продемонстровано на прикладі аварійного відокремлення від ОЕС Київського регіону. Бібл. 4, рис. 1.*

**Ключові слова:** автоматичне частотне розвантаження (АЧР), швидкість зниження частоти (ШЗЧ), налаштування.

Автоматичне частотне розвантаження (АЧР) виконує надзвичайно важливу функцію забезпечення живучості енергосистеми за умови раптового виникнення великих небалансів активної потужності внаслідок вимикання потужних енергоблоків електростанцій або відокремлення районів із значним дефіцитом або надлишком потужності [3]. В ОЕС України ця проблема має особливо гострий характер через велику частку атомних електростанцій, які висувають дуже жорсткі вимоги щодо аварійних відхилень частоти струму в енергосистемі. У світовій практиці ці процеси називають «стійкість за частотою», а вимоги європейського енергооб'єднання ENTSO-E наведено в документах [4]. Додатковими чинниками гостроти проблеми є концентрація на АЕС великої кількості блоків (наприклад, на Запорізькій АЕС 6000 МВт), невідповідність схем видачі потужності окремих АЕС проектним рішенням, наявність в ОЕС України гостродефіцитних вузлів і енергорайонів, де дефіцит генерації перевищує 50% споживання. Для таких вузлів і енергорайонів, як показують випадки їхнього аварійного відокремлення, що мали місце, існуюча система АЧР-ЧАПВ виявляється недостатньо ефективною.

Забезпечення заданих меж аварійних коливань потужності і частоти – одна з найвідповідальніших задач системи автоматичного протиаварійного керування режимом ЕЕС. Незадовільна робота цієї системи призводить до важких системних аварій із втратою централізованого електропостачання (знеструмленням) великих територій на тривалий час. Правильне налаштування пристроїв АЧР забезпечує її адаптивність за принципом побудови завдяки роздрібності керівних дій – вимикання, а потім увімкнення навантаження невеликими порціями, що балансує об'єм вимикання з величиною раптового дефіциту потужності в енергосистемі. Разом з тим для районів, які є гостродефіцитними навіть у нормальному стані, а ще більше – у ремонтних режимах, можуть виникати проблеми з налаштуванням АЧР, яке забезпечує усі вимоги до нього. Тут можуть стати у нагоді новітні пристрої автоматики, зокрема, мікропроцесорне реле УРЧ-3М-С, яке випускається вітчизняним підприємством РЕЛСІС і забезпечує контроль не тільки частоти струму, а й швидкості її змінювання.

**Мета даної роботи** – дослідити, чи забезпечує використання пристроїв, які вимірюють швидкість зниження частоти (ШЗЧ), виконання вимог щодо аварійних коливань частоти і обґрунтувати умови налаштування автоматики, яка використовує такі пристрої.

Теоретично у перший момент після раптового виникнення дефіциту активної потужності внаслідок вимикання генератора або відокремлення частини енергосистеми має місце найбільша швидкість зниження частоти. Початкове її значення відображає відносну величину дефіциту потужності, і цю інформацію можна отримати вже у момент виникнення збурення, що створює можливість підвищення адаптивності системи АЧР.

Практичні труднощі у використанні ШЗЧ пов'язані з тим, що реально при великому збуренні у системі виникають взаємні коливання синхронних машин, їхніх роторів і відповідно коливання векторів створюваних ними ЕРС і частоти струму в електричній мережі. Як наслідок, у миттєвій частоті з'являється істотна коливальна складова. Продемонструємо сказане розрахунками перехідних процесів у реальній схемі ОЕС України при можливих (з різною ймовірністю) аварійних збуреннях з порушенням балансу активної потужності. Розрахунки виконувалися за допомогою програмного комплексу АВР-74/06, розробленого в Інституті електродинаміки НАН України, в традиційній для розрахунку динамічної стійкості постановці: без врахування електромагнітних перехідних процесів в електричній мережі, але з врахуванням взаємних електромеханічних коливань синхронних генераторів [1]. Розрахунки виконувалися для режиму автономної роботи ОЕС України. У розрахунковій схемі 159 вузлів, 36 генераторів, сумарне навантаження близько 22000 МВт. Потужність Запорізької АЕС – 5000 МВт, Південно-Української АЕС – 2000 МВт, Хмельницької АЕС – 2000 МВт, Рівненської АЕС – 1700 МВт, потужність у перетині Захід-Вінниця 1770 МВт. Розрахунки були виконані для такої аварійної ситуації:

ділення ОЕС України по перетину Захід-Вінниця при виведених в ремонт ПЛ-750кВ Західно-Українська – Вінниця і ПЛ-330 кВ Хмельницька АЕС – Хмельницький внаслідок порушення стійкості.

Щоб аварійно відокремилась західна частина ОЕС від решти ОЕС, у розрахунках було задано наступне збурення: 3-фазне КЗ поблизу шин 750 кВ Хмельницької АЕС тривалістю 0,25с, з вимиканням КЗ і ПЛ-750 кВ Хмельницька АЕС–Чорнобильська АЕС. Через 0,65с відбувається порушення стійкості по зв'язках Захід-Вінниця, і автоматика ліквідації асинхронного режиму (АЛАР) вимикає ПЛ-330 кВ Шепетівка-Житомир, Тернопіль-Хмельницький та Івано-Франківськ-Чернівці.

За результатами розрахунків можна зробити такі висновки:

1. Частота в різних вузлах має значну коливальну складову.  
2. У моменти комутацій (вимикання ліній і генераторів) електричний режим системи різко змінюється, що призводить до зламів графіка зміни розрахункової частоти напруги у вузлах електричної мережі, яка обчислюється як відношення приросту кута вектора напруги до кроку розрахунку. Відповідно має місце стрибок похідної розрахункової частоти. Відзначимо, що існуючі мікропроцесорні пристрої реєстрації електричних параметрів, наприклад, «РЕГІНА-Ч» розробки ІЕД НАН України, де частота визначається через тривалість періоду, у момент комутації також фіксують стрибок частоти, оскільки при цьому відбувається стрибкоподібна зміна фази напруги, що призводить до істотного відхилення вимірюваної відстані (за часом) між точками переходу миттєвого значення напруги через нуль від величини періоду 0,02с, який відповідає частоті 50 Гц.

3. При збуренні з порушенням динамічної стійкості, в процесі наростаючого порушення стійкості (взаємного розвороту кутів ЕРС) до спрацювання АЛАР у вузлах, віддалених від перетину, де виникає електричний центр коливальних, – Запорізька АЕС, Південно-Донбаська ПС, Зуєвська ТЕС (Харцизьк), у графіках похідної частоти має місце половина гармоніки (синусоїди) з амплітудою 1 Гц/с, а на близьких станціях (Південно-Українська АЕС, Трипільська ТЕС) похідна за 0,7с змінюється з +1 до -1,2 Гц/с. Після відокремлення (з дефіцитом  $1700/20000=8,5\%$ ) має місце коливання похідної частоти, близьке до гармонійного, з амплітудою  $\pm 2$  Гц/с (Трипільська ТЕС),  $\pm 1$  Гц/с (ПС Південно-Донбаська),  $0 \div -1$  Гц/с (Південно-Українська АЕС).

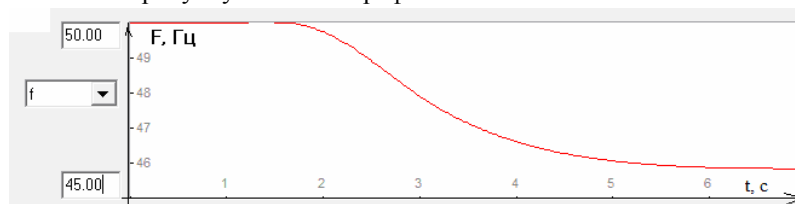
4. У цілому можна констатувати, що істотне відхилення значень ШЗЧ у різних вузлах електричної мережі вимагає детального аналізу аварійних процесів для налаштування АЧР з використанням ШЗЧ, яке забезпечить підвищення її адаптивності.

За результатами виконаного нами аналізу НЕК «Укренерго» розробило нову редакцію ГНД «Застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах. Правила.» [2], де висвітлено питання практичної реалізації АЧР-Ш. Розділ 10 цього документа містить «Вимоги до впровадження в ОЕС України АЧР-1Ш та додаткового автоматичного розвантаження».

Ефективність АЧР-1Ш продемонструємо на прикладі аварійного відокремлення від ОЕС Київського регіону. Сценарій аварії сформовано з урахуванням причин аварії 04.11.2014 р. в ЄЕС Росії з погасанням Ростовської АЕС потужністю 2000 МВт, яке призвело до знеструмлення Північно-Кавказького регіону Росії з населенням 4,5 млн. осіб та роботи АЧР не тільки в енергосистемах Росії, а й України, Азербайджану та Грузії. Внаслідок помилки оперативного персоналу напруга була подана на заземлену ділянку шин, що спричинило через неселективну (надлишкову) дію релейного захисту вимикання кількох ліній 500 кВ, порушення стійкості Ростовської АЕС, її погасання і відокремлення від ЄЕС великого регіону. У модельному сценарії об'єктом аварії обрано Хмельницьку АЕС. На ПЛ-750 кВ ХАЕС-ЧАЕС поблизу шин ХАЕС виникає несиметричне КЗ (умовний час  $t=0,1$  с), і захист діє на вимикання вимикачів В20 і В21. Однак, внаслідок відмови вимикача В21 діє із затримкою 0,16 с пристрій резервування відмови вимикача на вимикання В31 (приєднання блоку 2) і В11 (приєднання автотрансформатора 750/330 кВ), В20 (спільний для приєднання ліній ЧАЕС і Західно-Українська). У результаті вимикаються з затримкою 0,20 с лінії на ЧАЕС (вузли 808-703 у розрахунковій схемі) і ПС-750 кВ Західно-Українська (вузли 808-945). Сигнал на вимикання блоку 2 за фактом вимикання двох ліній 750 кВ не проходить, і генератор блоку вимикається після порушення стійкості і виникнення багаточастотного асинхронного режиму. Автоматика ліквідації асинхронного режиму вимикає лінії по перетину ОЕС-Київ. Таким чином, внаслідок двох важких відмов – вимикача і релейного захисту у режимі з ремонтом двох елементів – вимикача і лінії 330 кВ відокремлюється від ОЕС гостродефіцитний Київський регіон.

Були виконані розрахунки з врахуванням дії АЧР-1Ш відповідно до вимог нової редакції ГНД, в якій розглянуто питання практичної реалізації АЧР-1Ш. У розрахунках було передбачено 6 черг АЧР-1Ш у Київському регіоні сумарним об'ємом 1165 МВт з уставками за швидкістю зниження частоти 2,2.....1,7 Гц/с, пуском за частотою  $\leq 49,5$  Гц, з витримкою часу 0,2 с.

На рисунку показано графік зміни частоти на шинах 330 кВ Трипільської ТЕС при відокремленні Київського регіону від ОЕС України внаслідок



висшезаданого аварійної ситуації, з якого видно, що, завдяки спрацюванню АЧР-1Ш у повному обсязі, зміна частоти не перевищує нормативних значень.

**Висновки.** 1. Розрахунками показано, що використання пристроїв, які вимірюють швидкість зниження частоти (ШЗЧ), забезпечує виконання нормативних вимог щодо аварійних коливань частоти (завдяки виконанню АЧР-ІШ частота після великого аварійного збурення не знижується нижче 45 Гц).

2. Обґрунтовано умови налаштування АЧР-ІШ з використанням ШЗЧ (обмеження на уставки АЧР-ІШ, пов'язані з коливанням по-хідної миттєвої частоти у вузлах електричної мережі).

1. Авраменко В.Н., Крылов В.А., Черненко П.А., Прихно В.Л. Математические модели и программные средства для решения задач автоматизированного диспетчерского управления энергосистемами. – Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2012. – 303 с.

2. ГНД 34.20.567-2012. Застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах. Правила. – К.: Міністерство палива та енергетики України, 2012.

3. Рабинович Р.С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем // М.: Энергия, 1980. – 344 с.

4. 19. ENTSO-E Operation Handbook. P1 – Policy I: Load-Frequency Control and Performance. – 33 p.  
[https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/entsoe/Operation\\_Handbook/Policy\\_1\\_final.pdf/](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf/)

УДК 621.311.001.18

## УСКОРЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКОРОСТИ СНИЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ

В.Н. Авраменко, докт.техн.наук, Н.Т. Юнеева, канд.техн.наук, Т.М. Гуреева

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: [avr@ied.org.ua](mailto:avr@ied.org.ua)

*Показано, что использование устройств, измеряющих скорость снижения частоты, обеспечивает выполнение требований по аварийным колебаниям частоты. Обоснованы условия настройки автоматики, используемой подобными устройствами. По результатам выполненного анализа НЭК «Укрэнерго» разработано новую редакцию ГКД «Применение системной протиаварийной автоматики предотвращения и ликвидации опасного снижения или повышения частоты в энергосистемах», в которой освещены вопросы практической реализации АЧР-Ш. Эффективность АЧР-ІШ продемонстрирована на примере аварийного отделения от ОЭС Киевского региона. Библ. 4, рис. 1.*

**Ключевые слова:** автоматическая частотная разгрузка (АЧР), скорость снижения частоты (ШЗЧ), настройка.

## ACCELERATING OF ACTION AUTOMATIC FREQUENCY UNLOADING OF THE POWER SYSTEM THROUGH THE USE OF SPEED DECREASE OF FREQUENCY

V.N. Avramenko, N.T. Iunieieva, T.M. Hurieieva

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: [avr@ied.org.ua](mailto:avr@ied.org.ua)

*It is proved that the use of devices which measure the decrease of the frequency ensures the requirements of the emergency of frequency oscillations. Setting reasonable terms of automation, which uses a similar device. According to the results of the analysis "Ukrenergo" has developed a new version of the document "The use of emergency control system to prevent and eliminate or reduce the dangerous frequency increase in power systems", which address the issues of practical implementation of the AFU-S. The effectiveness of AFU-S demonstrated by the emergency department of the Kiev region of UPS of Ukraine. References 4, figure 1.*

**Keywords:** automatic frequency unloading (AFU), speed reduction in frequency, settings.

1. Avramenko V.N., Krylov V.A., Chernenko P.A., Pryhno V.L. Mathematical models and software tools for solving problems of automated supervisory control of power systems. – Kiev: Institut Elektrodinamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2012. – 303 p. (Rus)

2. MOA 34.20.567-2012. The use of emergency control system to prevent and eliminate or reduce the dangerous frequency increase in power systems. Rules. – Kyiv: Ministerstvo Palyva ta Enerhetyky Ukrainy, 2012. (Ukr)

3. Rabinovich R.S. Automatic frequency unloading of power systems // Moskva: Energiia, 1980. – 344 p. (Rus)

4. 19. ENTSO-E Operation Handbook. P1 – Policy I: Load-Frequency Control and Performance. Available at: [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/entsoe/Operation\\_Handbook/Policy\\_1\\_final.pdf/](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf/) – 33 p.

Надійшла 03.02.2016

Остаточний варіант 11.04.2016