

ПИТАННЯ РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМОЇ АВТОМАТИКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

О.Ф. Буткевич^{*1,2}, докт. техн. наук, **Т.М. Гурєєва¹**, **Н.Т. Юнєєва¹**, канд. техн. наук

1 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

2 – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна

e-mail: o.butkevych@gmail.com, untunt1970@gmail.com

Розглянуто особливості підходу, використаного для розроблення цифрових моделей пристроїв системної автоматизації електроенергетичних систем (ЕЕС). Показано роль графічного інтерфейсу як інструментального засобу підготовки таких моделей та маніпулювання ними для ефективного формування та використання зазначених моделей під час моделювання аварійних режимів ЕЕС. На прикладах автоматизації частотного розвантаження (АЧР) та автоматизації ліквідації асинхронних режимів (АЛАР) проаналізовано особливості функціонування та налаштування моделей. Наведено результати використання розроблених моделей АЛАР під час моделювання аварійних режимів об'єднаної енергосистеми України з виявленням електричного центру хитань на лініях електропередавання напругою 750 і 330 кВ у Західній і Південно-Західній ЕЕС. Для перевірки адекватності моделей АЧР було використано дані щодо АЧР, отримані від регіональних енергосистем України. Моделювані аварійні збурення призводили до виникнення дефіциту активної потужності генерування та пониження частоти, внаслідок чого спрацьовували пристрої АЧР. Бібл. 3, рис. 8.

Ключові слова: електроенергетична система, аварійний режим, системна автоматизація, моделювання.

Запобігати розвитку аварій та втраті стійкості електроенергетичної системи має релейний захист та протиаварійна автоматизація (ПА). Результати моделювання аварійних електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС залежать, насамперед, від адекватності моделей складових комплексної моделі ЕЕС, зокрема (і не в останню чергу) від моделей релейного захисту та протиаварійної автоматизації (ПА). Із метою узагальнення (без втрати функціональних особливостей під час формалізації опису моделей) релейний захист розглядаємо як складову системної автоматизації. Моделювання аварійних процесів в ЕЕС може мати різне призначення – дослідження проблеми стійкості ЕЕС, вибір уставок пристроїв ПА, вибір чи перевірка відповідності комутаційного обладнання та інше. Кожна автоматизація є елементом функціональної структури певної підсистеми ПА, а сукупність таких підсистем утворює функціональну структуру ПА певного енерговузла, енергорайону, ЕЕС чи об'єднаної ЕЕС (ОЕС). У сучасних мікропроцесорних пристроях поєднують функції захисту, автоматизації, контролю та управління. До таких мікропроцесорних пристроїв належать, наприклад, 7UT513 (виробництва фірми «Siemens») і МРЗС-05-01 (виробництва заводу «Київприлад»). Однак під час розроблення моделей пристроїв релейного захисту та системної автоматизації (використовуватимемо узагальнювальне позначення РЗА) достатньо забезпечити лише *функціональну* відповідність моделі оригіналу (конструктивні особливості та характеристики реальних пристроїв РЗА впливатимуть лише на значення відповідних параметрів, відтворених у моделях), що дає змогу використати уніфікований підхід до побудови моделей, передбачаючи врахування такої послідовності дій пристроїв РЗА під час їхнього функціонування (хоча не всі автоматизації мають обов'язково виконувати всі дії): 1) фіксація аварійної події чи виявлення виходу значень параметрів режиму ЕЕС за допустимі межі; 2) запам'ятовування стану та значень параметрів до аварійного режиму ЕЕС; 3) оцінювання інтенсивності аварійного збурення; 4) визначення необхідних керуючих дій за результатами оцінювання інтенсивності аварійного збурення (в окремих пристроях дії можуть бути апріорі визначеними); 5) формування та «видача» керуючих впливів (у вигляді вихідних сигналів керування).



Метою роботи є створення цифрових моделей та алгоритмів функціонування засобів системної автоматики та перевірка адекватності їхньої поведінки під час моделювання аварійних режимів ЕЕС.

Структурні особливості моделей пристроїв РЗА та засоби графічного інтерфейсу.

Потреба уніфікації опису моделей з одночасним забезпеченням певної гнучкості їхнього використання зумовлена наявністю великої номенклатури пристроїв РЗА, які використовують в ЕЕС, та значної кількості варіантів організації системи ПА. Під час розроблення моделей автоматики використано принцип формування *елементарних* (атомарних) умов, згідно з яким маємо насамперед дати відповіді на запитання «де?», «що?», «скільки?», тобто вказати об'єкт, величину чи дію, що контролюється, уставку чи величину впливу [1]. Об'єктами є вузли, лінії електропередачі (ЛЕП), перетини ЕЕС. За умовами перевіряються, наприклад, значення певних режимних параметрів, сальдо потужності в перетині та інше, контролюється стан (увімкнений чи вимкнений) певних елементів ЕЕС, час затримки (витримки часу) на виконання (чи невиконання, якщо не задовольняються відповідні умови) наступної дії. Крім того, використання моделей різних пристроїв РЗА під час моделювання аварійних режимів ЕЕС обов'язково мають забезпечувати потреби введення в роботу чи виведення з роботи окремих пристроїв чи підсистем РЗА, моделювання їхнього функціонування за заданою часовою програмою та моделювання відмов окремих пристроїв. *Елементарна* умова формується завданням об'єкта, де вимірюється контрольована величина, ідентифікатора контрольованої величини та уставки. Аналогічно визначається елементарний вплив: об'єкт, ідентифікатор впливу, величина впливу. Логічною конкатенацією *елементарних* умов можна сформувати складніші логічні конструкції, що відтворюють умови функціонування пристроїв чи систем автоматики. У загальному випадку вихідний сигнал (вектор сигналів) S_{out} пристрою (системи) ПА є результатом відповідного опрацювання (Φ) послідовностей сформованих умов (F), до яких входять дискретні сигнали (d), вимірювані та обчислювані параметри режиму (p_p) та системи (p_c), витримки часу (t):

$$S_{out} = \Phi [F_1(p_c, p_p, d, t), F_2(p_c, p_p, d, t), \dots, F_t(p_c, p_p, d, t), \dots]$$

Розроблені моделі РЗА організовано у вигляді відповідної бібліотеки. Блок-схему моделювання аварійних перехідних процесів в ЕЕС з урахуванням функціонування пристроїв релейного захисту та протиаварійної автоматики (РЗА) наведено на рис. 1.

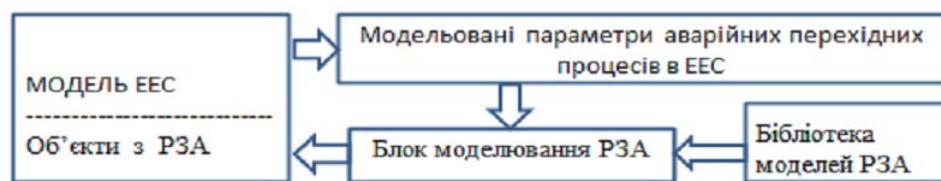


Рис. 1. Блок-схема моделювання аварійних перехідних процесів в ЕЕС з урахуванням функціонування пристроїв РЗА

Бібліотеку моделей пристроїв РЗА організовано у вигляді файлової структури, що забезпечує гнучкість і незалежність використання моделей та дає змогу зберігати різні варіанти моделювання (за різними сценаріями) аварійних режимів ЕЕС. Відсутні обмеження щодо кількості та типів моделей, що зберігаються в бібліотеці. Для використання моделей пристроїв системної автоматики під час моделювання аварійних електромеханічних перехідних процесів у конкретних ЕЕС слід попередньо «встановити» такі пристрої в ЕЕС (копії моделей із бібліотеки моделей РЗА отримують «адресне прив'язування» до об'єктів, каналів отримання інформації). Для формування моделей РЗА та їхнього «встановлення» на об'єктах ЕЕС, для маніпулювання моделями (тут мається на увазі «виведення з роботи»/«введення в роботу», зміна значень параметрів, зміна/коригування умов та інше) розроблено засоби графічного інтерфейсу. Операційне вікно зазначеного графічного інтерфейсу показано на рис. 2, його можна умовно поділити на три зони: «Дія автоматики», «Перетини» та «Об'єднана дія». Перша із зазначених зон призначена для формування завдання на моделювання пристроїв

РЗА в разі врахування дії таких пристроїв під час моделювання аварійних електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС. У правій частині цієї зони розташовано клавіші та віконця, які дають змогу формувати моделі пристроїв автоматики. Активні віконця («Вузли», «Лінії електропередавання») призначені для вибору об'єктів, де вимірюються контрольовані параметри чи реалізуються керуючі впливи.

Цей інтерфейс дає змогу конструювати всі послідовності дій різних пристроїв РЗА, які відтворюються в моделях. Засоби зазначеного графічного інтерфейсу надають можливість зберігати в бібліотеці моделі пристроїв РЗА під унікальним ім'ям (із коротким коментарем за потреби) та зачитувати моделі з бібліотеки для встановлення на об'єктах.

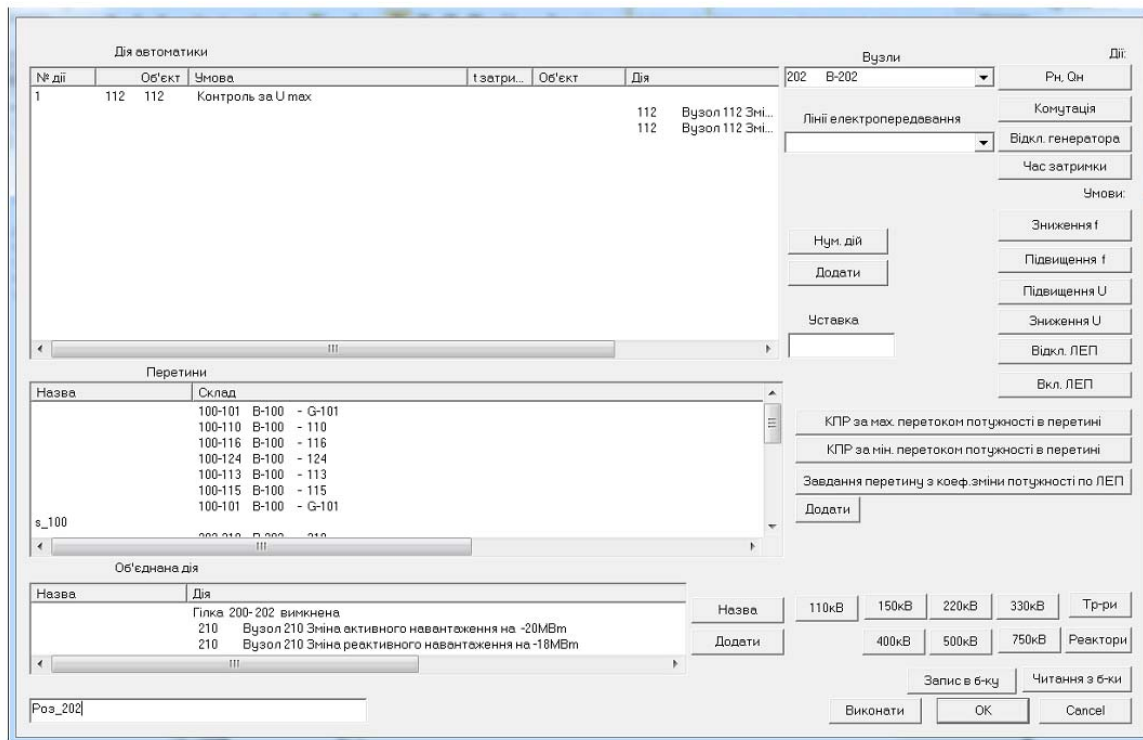


Рис. 2. Операційне вікно графічного інтерфейсу для роботи з моделями пристроїв РЗА

Усі цифрові моделі пристроїв РЗА реалізовано у вигляді незалежних програмних модулів.

Деякі особливості функціонування та налаштування моделей автоматики частотного розвантаження. Для категорій АЧР-I та АЧР-II ідентифікатором контрольованої величини є частота в ЕЕС, а щодо уставки для АЧР передбачено використання пари значень – частоти та витримки часу на спрацювання (після витримки часу на спрацювання в моделі АЧР має вступати в дію наступний елемент модельованої структури ПА – елементарний вплив). Під час налаштування моделей АЧР слід передбачити, щоб потужність споживачів електроенергії, що приєднується до АЧР-I, рівномірно розподілялася між чергами АЧР у діапазоні 48,8...46,5 Гц з інтервалом у 0,1 Гц. Обсяги потужності, заведені під АЧР, залежать від потужності електроспоживання конкретних ЕЕС. Щоб уникнути надлишкового вимкнення споживачів за різних аварій із дефіцитом генеруючої потужності слід використовувати велику кількість черг АЧР (чим більшою є кількість черг, тим гнучкішою є система АЧР), мінімізуючи обсяги вимкнення потужності споживачів (розроблені програмні засоби та бібліотека моделей РЗА дають змогу практично не обмежувати кількість черг АЧР, яка залежатиме від значень параметрів моделей пристроїв АЧР). Під час налаштування моделей як початкові значення витримок часу на спрацювання для всіх черг АЧР-I автоматично встановлюється (як усталено) 0,1 с, передбачаючи, що в фізичних пристроях АЧР використовуються напівпровідникові реле частоти. За потреби для окремих моделей пристроїв значення параметрів може бути змінено з використанням засобів графічного інтерфейсу.

Під час налаштування параметрів моделей пристроїв АЧР-II як верхній рівень уставок передбачено використання (як усталено) 49,0 Гц, що на 0,2 Гц вище від верхнього рівня

уставок частоти АЧР-I. Витримки часу (уставки за часом) пристроїв АЧР-II відрізняються одна від одної на 3 с і зростають (до 60 с, а за потреби можуть бути збільшені до 90 с), починаючи від черг АЧР-II із максимальними уставками частоти до черг АЧР-II із мінімальними уставками. Якщо дефіцит потужності досягатиме максимального розрахункового, то кінцевий час дії АЧР-II визначатиметься її кінцевими уставками. Для забезпечення гнучкішої дії АЧР передбачено також сумісну дію АЧР-I та АЧР-II на відключення одних і тих же споживачів, що здебільшого дає змогу відновити частоту до рівня уставки АЧР-II 48,8 Гц (обсяг несуміщених черг АЧР-II має бути не меншим 10 % від встановленої потужності ЕЕС).

Відмінністю моделей пристроїв АЧР-III і АЧР-I є наявність додаткового контролю швидкості зниження частоти, оскільки пристрої АЧР-III функціонують у разі виникнення значного дефіциту активної потужності. Такий контроль здійснюється додатково до контролю уставки за частотою, подібно до моделей АЧР-I. Якщо швидкість зниження частоти перевищує 1,7 Гц/с, то починають діяти черги АЧР-III, але обсяги потужності споживачів, «заведених під» черги АЧР-III, мають бути значно більшими від обсягів, «заведених під» черги АЧР-I. Якщо швидкість зниження частоти вже не перевищує 1,7 Гц/с, то замість АЧР-III продовжує діяти АЧР-I. Контроль швидкості зниження частоти ($\frac{\Delta f}{\Delta t} > 1,7 \frac{\text{Гц}}{\text{с}}$) відповідно до [2] здійснюється в розроблених програмних засобах блоком автоматики, який слідує і за швидкістю зниження частоти, маючи дані щодо об'єктів із встановленими пристроями АЧР-III.

В утилітарному аспекті доцільно підкреслити, що початкові налаштування параметрів цифрових моделей АЧР усіх трьох категорій АЧР виконуються відповідно до кодування структури протиаварійної автоматики з урахуванням формування елементарних умов. Початкове налаштування стосується тих параметрів моделей, які не залежать від схем різних ЕЕС і зумовлені лише фізикою протікання аварійних процесів унаслідок виникнення дефіциту генеруючих потужностей та відповідного зменшення частоти. Оскільки *ідентифікатор об'єкта*, де вимірюється контрольована величина, як і *ідентифікатор впливу*, залежать від конкретної ЕЕС, тобто від конкретних об'єктів та відповідних шин, де вимірюється частота й вимикаються фідери, від яких живляться споживачі електроенергії певної потужності навантаження (реалізуються *впливи* АЧР-I та АЧР-II зменшенням потужності електроспоживання), то значення відповідних параметрів вводяться до моделей АЧР-I та АЧР-II із використанням розроблених інструментальних засобів графічного інтерфейсу вже під час «розміщення» таких пристроїв АЧР на об'єктах конкретної ЕЕС.

Перевірка адекватності функціонування моделей АЧР. Перевірку адекватності функціонування моделей АЧР у складі програмного комплексу моделювання електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС виконано з використанням моделі ЕЕС, що містила частково згорнуту (еквівалентну) схему системотвірної мережі ОЕС України, де було враховано 794 пункти (вузли), 1292 ЛЕП (гілок) та 68 синхронних генераторів. Для модельованого режиму було використано дані щодо АЧР, отримані від регіональних енергосистем України. Модельовані аварійні збурення призводили до виникнення дефіциту активної потужності генерування та пониження частоти, унаслідок чого спрацьовували пристрої АЧР. Тривалість моделювання відповідного аварійного електромеханічного перехідного процесу в ЕЕС становила 30 с, використовувався середньоінтервальний метод чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, крок чисельного інтегрування брався незмінним і становив 0,02 с. Приклади відображення інформації щодо перебігу модельованого аварійного процесу ілюструють рис. 3 та 4, де відповідно показано фрагмент протоколу реєстрації подій та графіки зміни потужності навантаження й частоти на шинах електричної підстанції (ПС) 110 кВ «Каховська ГПП» Південної ЕЕС.

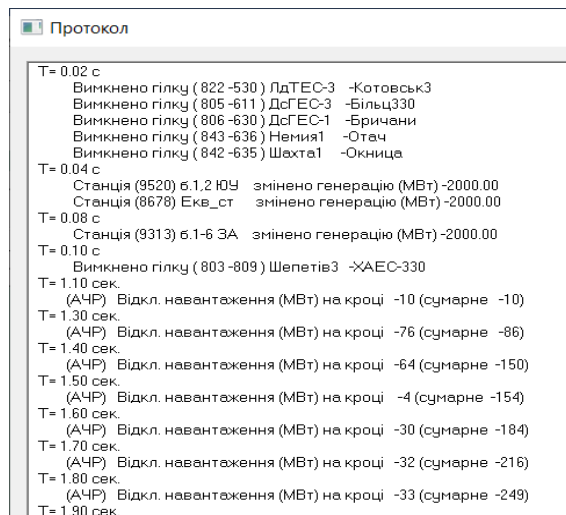


Рис. 3. Фрагмент протоколу реєстрації подій під час моделювання аварійного режиму ЕЕС з урахуванням АЧР

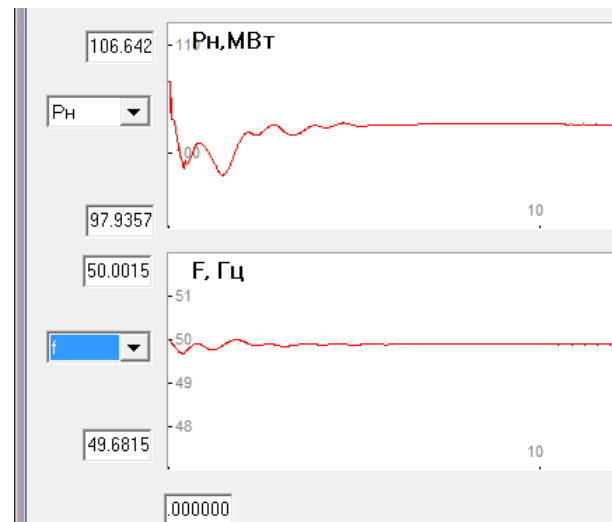


Рис. 4. Графіки зміни потужності навантаження і частоти на шинах ПС 110 кВ «Каховська ГПП» Південної ЕЕС

Деякі особливості функціонування моделей автоматики ліквідації асинхронного режиму. Під час розроблення моделей пристроїв АЛАР урахувано, що типовий пристрій АЛАР має до трьох ступенів спрацьовування, які ініціюються різними пусковими пристроями в різних поєднаннях. Наприклад, у мікропроцесорному пристрої АЛАР, реалізованому на базі модуля РЗА "Діамант" виробництва НВП Хартрон-Інкор (м. Харків) [3], виконано три ступені спрацьовування. Виявлення асинхронного режиму (АР) відбувається на підставі того, що кінець вектора вимірюваного комплексного опору (на комплексній площині значення опору можна подати координатами кінця відповідного вектора) потрапляє в зони спрацьовування, які мають прямокутну форму. Використано три зони, дві з яких (аналоги чутливого та грубого реле опору) для запобігання спрацьовуванню пристрою в разі короткого замикання без виникнення АР, а третя (для перевірки місця знаходження електричного центру хитань ЕЦХ) – для забезпечення селективності дії. Пристрій підраховує цикли АР. Перший та другий ступені можуть видавати сигнали для реалізації керівних впливів (дій) із метою збереження стійкості ЕЕС та швидкої ресинхронізації її частин (вимикання або розвантаження генераторів у надлишковій за генеруючою потужністю частині ЕЕС, вимикання навантаження у її дефіцитній частині), третій ступінь діє на вимикання ЛЕП.

У розроблених цифрових моделях АЛАР передбачено такі поєднання пускових пристроїв: із використанням лічильника циклів (фізично реалізованого на базі реле напрямку потужності) та контролем селективності (фізично контроль здійснюється з використанням реле опору); із лічильником циклів (фізично реалізованим на базі реле напрямку потужності) та з контролем модуля струму ЛЕП (фізично реалізовано на базі реле максимального струму).

Під час моделювання електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС на об'єктах, де встановлено пристрої АЛАР, у точках часової дискретизації процесу моделювання визначаються ті параметри, за якими діють пускові пристрої АЛАР. Функціонування (спрацьовування) цифрових моделей пристроїв АЛАР відбувається відповідно до заданих у цих моделях умов та значень відповідних атрибутів моделей (параметрів), які можна змінювати (за потреби), використовуючи розроблені засоби графічного інтерфейсу.

Перевірка адекватності функціонування моделей АЛАР. Перевірку адекватності функціонування моделей АЛАР у складі програмного комплексу моделювання електромеханічних перехідних процесів в ЕЕС виконано з використанням тієї ж моделі ЕЕС, що і для перевірки моделей АЧР. Навантаження відповідали режиму зимового максимуму. Спочатку було виконано додаткове завантаження частини ЛЕП ОЕС України відключенням ЛЕП, що з'єднує розподільчі пристрої 750 кВ Хмельницької та Чорнобильської АЕС, із одночасним завантаженням блоку Рівненської АЕС та розвантаженням Київської ГЕС. Аварійним збу-

ренням, унаслідок якого втрачалася стійкість системи, було вимкнення ЛЕП, що поєднує розподільчі пристрої 330 кВ ПС Шепетівка 330 кВ та Хмельницької АЕС. Під час моделювання аварійного режиму було виявлено ЕЦХ на ЛЕП напругою 750 і 330 кВ в Західній і Південно-Західній ЕЕС, що відображено в протоколі реєстрації подій (рис. 5) та на графіках зміни потоків потужностей ЛЕП та різниці кутів (Δ кутів) між векторами напруги на шинах ПС Вінниця 750 кВ та ПС Західноукраїнська 750 кВ (рис. 6).

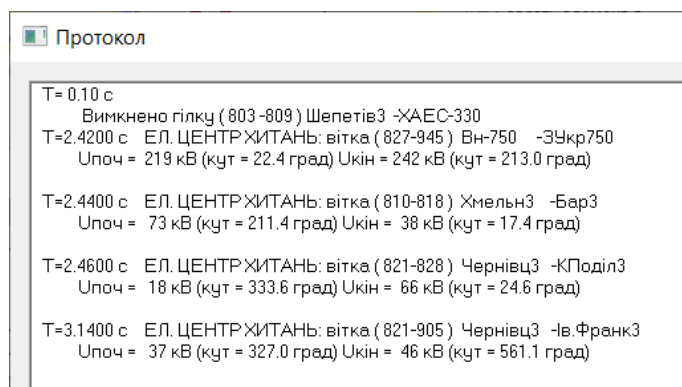


Рис. 5. Фрагмент протоколу реєстрації подій під час моделювання аварійного режиму ЕЕС з урахуванням АЛАР

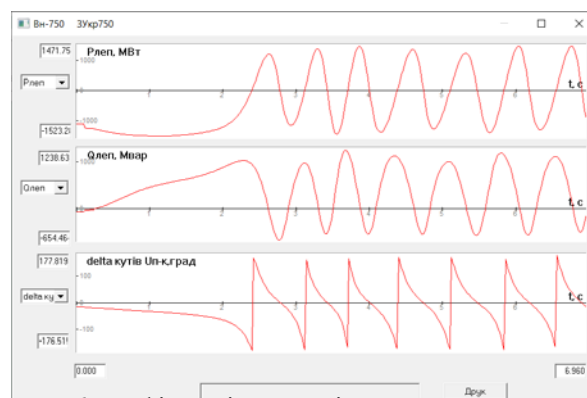


Рис. 6. Графіки зміни потоків активної та реактивної потужності ЛЕП та різниці кутів між векторами напруги на з'єднаних нею шинах ПС Вінниця 750 кВ та ПС Західноукраїнська 750 кВ

На рис. 7 наведено годограф вхідного опору, побудованого за вимірами пристрою АЛАР (встановленого на шинах приєднання ЛЕП, що з'єднує ПС Вінниця 750 кВ та ПС Західноукраїнська 750 кВ), та відповідний протокол (рис. 8), отримані внаслідок моделювання аварійного режиму ЕЕС із урахуванням АЛАР зазначеного вище мікропроцесорного пристрою «Діамант».

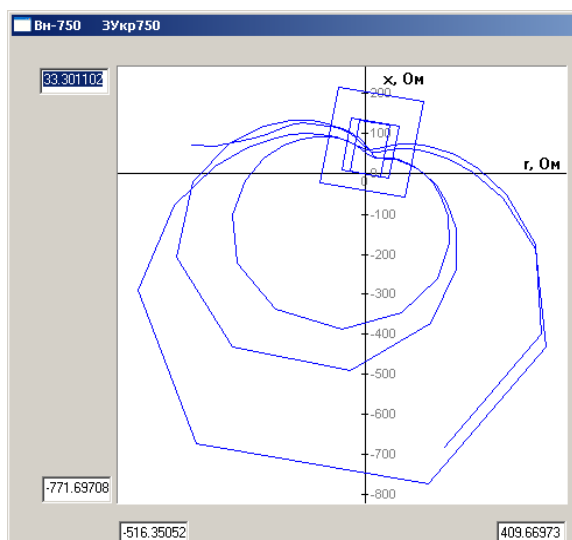


Рис. 7. Годограф вхідного опору, побудованого за вимірами пристрою АЛАР

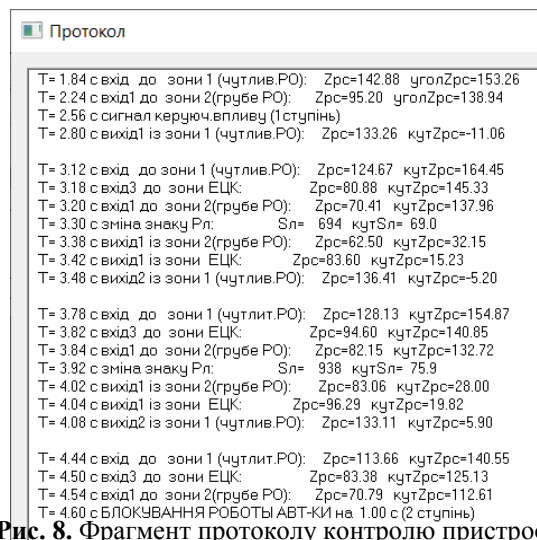


Рис. 8. Фрагмент протоколу контролю пристроєм АЛАР значень вхідного опору під час моделювання аварійного режиму ЕЕС

Висновки. Із використанням уніфікованого підходу до формування (конструювання) моделей пристроїв системної автоматики ЕЕС розроблено цифрові моделі таких пристроїв та перевірено адекватність їхнього функціонування. Розроблені засоби графічного інтерфейсу

забезпечують високу ергономічність та ефективність формування та використання зазначених моделей під час моделювання аварійних режимів ЕЕС.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E» (шифр «РЕЖИМ-2», КПКВК-6541230).

1. Буткевич О.Ф., Гурєєва Т.М., Юнєєва Н.Т. Особливості розроблення та використання моделей протиаварійної автоматики енергосистем. *Electrical and Power Engineering and Electromechanics* (EPEE 2024). Odesa, Ukraine, May 15, 2024. Odesa Military Academy. С. 17–18. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25858477>
2. Правила застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1896-12#n354>
3. ПМ РЗА "ДІАМАНТ" – Комплекс технических средств автоматизации, защиты и АСУТП энергетических объектов. URL: <https://leg.co.ua/stati/rzaia/pm-rza-diamant-kompleks-tehnicheskikh-sredstv-avtomatizacii-zaschity-i-asutp-energeticheskikh-obektov.html>

THE ISSUES OF THE SYSTEM AUTOMATION MODELS DEVELOPMENT FOR POWER SYSTEMS FAULT CONDITION STUDY

O.F. Butkevych^{1,2}, T.M. Hurieieva¹, N.T. Yunieieva¹

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteiskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

2 – National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Beresteiskyi ave. 37, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: o.butkevych@gmail.com, untunt1970@gmail.com

The peculiarities of the approach used to the development of digital models of system automation devices for power systems fault condition simulation are considered. Some issues related to the practical development of digital models of system automation devices of power systems are briefly outlined. The role of the graphical interface as a tool for preparing such models and manipulating them is shown. Using the examples of automatic frequency unloading and automatic elimination of asynchronous modes, the peculiarities of the functioning and setting up of the models are analyzed. The results of the use of the developed models during the Interconnected power system (IPS) of Ukraine fault condition simulation are presented. The results of the use of the developed automatic elimination of asynchronous modes during the simulation of emergency modes of the IPS of Ukraine with the detection of the electrical center of oscillations on the 750 kV and 330 kV power transmission lines in the Western and South-Western power system are presented. To check the adequacy of the automatic frequency unloading models, the data obtained from the regional power systems of Ukraine were used, the simulated emergency disturbances led to a shortage of active generating power and a decrease in frequency, as a result of which the automatic frequency unloading devices were activated. Ref. 3, fig. 8.

Key words: power system, power system fault condition, system automation, simulation.

1. Butkevych O.F., Hurieieva T.M., Yunieieva N.T. The peculiarities of the development and use of emergency automation models of power systems. *Electrical and Power Engineering and Electromechanics* (EPEE 2024). Odesa, Ukraine, May 15, 2024. Odesa Military Academy. Pp. 17–18. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25858477> (Ukr)
2. The rules for the use of system anti-emergency automation for the prevention and elimination of a dangerous frequency decrease or increase in power systems. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1896-12#n354> (Ukr)
3. PM RZA DIAMANT. A complex of technical means of automation, protection and automated control systems of power objects. URL: <https://leg.co.ua/stati/rzaia/pm-rza-diamant-kompleks-tehnicheskikh-sredstv-avtomatizacii-zaschity-i-asutp-energeticheskikh-obektov.html> (Rus)

Надійшла: 10.10.2024

Прийнята: 28.10.2024

Submitted: 10.10.2024

Accepted: 28.10.2024