

УДК 621.311.001.57

## ФОРМУВАННЯ ПІДХОДУ ДО ВЕРИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

**В.В. Павловський**, докт. техн. наук, **О.В. Ленґа**, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03380, Україна

*Запропоновано підхід до верифікації динамічної моделі ОЕС України з урахуванням доступних засобів моніторингу та особливостей їх використання. Наведено приклад верифікації цифрової моделі з використанням даних системи SCADA/EMS та WAMS для реального збурення, що мало місце в ОЕС України. Бібл. 6, рис. 5, табл. 2.*

**Ключові слова:** енергосистема, перехідні процеси, цифрова модель, верифікація, WAMS.

Цифрова модель енергосистеми є ключовим інструментом, на який спираються інженери при плануванні режимів та експлуатації енергосистем. Вона використовується для моделювання нормальних та аварійних режимів роботи з метою підвищення ефективності та економічності, визначення впливу різноманітних збурень на надійність енергосистеми. Результати моделювання використовуються для настроювань автоматичних регуляторів, уставок релейного захисту та протиаварійної автоматики. Тому важливим питанням є підвищення якості цифрової моделі енергосистеми, що дає змогу уточнювати максимально допустимі перетоки по контрольованих перетинах та коректувати області стійкості. Підвищення точності моделі досягається в процесі її верифікації [1].

Верифікація динамічної моделі енергосистеми виконується шляхом порівняння параметрів перехідного процесу, зареєстрованого при виникненні збурення, з аналогічними розрахунковими параметрами, отриманими при його моделюванні. Для цього енергосистема має бути спостережуваною, що визначає можливість оцінки параметрів її режиму з використанням різноманітних технічних засобів. У процесі верифікації цифрової моделі виконують коректування параметрів елементів енергосистеми та настроювань регуляторів. Моделі пасивних елементів мережі, таких як лінії та трансформатори, є добре вивчені. В той же час моделювання поведінки синхронних генераторів та їх систем керування під час виникнення збурень у мережі є достатньо складним та потребує уточнення. В першу чергу це стосується параметрів автоматичних регуляторів збудження та швидкості, особливо нових, що часто встановлюються без належних настроювань [2]. Як показує закордонний досвід [4], вирішення цього завдання пов'язане з розвитком технологій WAMS (*Wide Area Measurement System*) та встановлення реєстраторів PMU (*Phasor Measurement Unit*) на електричних станціях, що підвищує загальну спостережуваність режимів та дає можливість значно покращити модель енергосистеми в процесі її верифікації.

За останні роки в ОЕС України було запроваджено значну кількість систем моніторингу, серед яких можна виділити такі: система SCADA/EMS, WAMS на базі пристроїв «Регіна-Ч» та реєстратори аварійних подій, встановлені на окремих станціях та підстанціях. Система SCADA/EMS дає змогу виконувати централізований збір інформації від пристроїв телевимірювання та телесигналізації. Для розв'язання задач оперативного управління з використанням даних системи SCADA/EMS персонал системного оператора ОЕС України використовує програмний комплекс «КОСМОС», що виконує оцінку стану та розрахунок усталеного режиму на базі телеметричної інформації. Недоліком такої системи є низька дискретність збору інформації, що складає 1...10 с та недостатня точність синхронізації вимірів. Це унеможливує її використання для моніторингу перехідних процесів. З іншого боку, розгалужена мережа телевимірювань та телесигналізації дає можливість оцінки усталеного режиму ОЕС України. З точки зору дослідження перехідних процесів SCADA/EMS

та КОСМОС є ідеальними для формування моделі доаварійного усталеного режиму, як початкових умов моделювання.

Іншою системою, елементи якої вводяться в експлуатацію в ОЕС України, є *WAMS* на базі пристроїв «Регіна-Ч». *WAMS* є глобальною для території України, охоплює ключові вузли ОЕС України і здійснює синхронізований моніторинг та реєстрацію системних параметрів нормальних (усталених) і аварійних (перехідних) режимів роботи електроенергетичних систем. Система включає в себе *PMU* з багатофункціональними вимірювальними перетворювачами для вимірювання миттєвих значень фазних струмів і напруги та розрахунку електричних параметрів [3]. Цінність такої інформації полягає у високій частоті дискретизації та точності синхронізації вимірювань, що проводяться пристроями. Таким чином, отримані дані дають змогу спостерігати “динаміку протікання” перехідних процесів в енергосистемі на глобальному рівні. Але недостатня кількість *PMU* на електричних станціях ОЕС України та більшості підстанцій напругою 330 кВ знижує спостережуваність енергосистеми та, зокрема, унеможлиблює відслідковування поведінки автоматичних регуляторів збудження та швидкості синхронних генераторів. Незважаючи на згадані вище недоліки, *WAMS* на базі пристроїв «Регіна-Ч» не має аналогів за якісними показниками при моніторингу протікання перехідних процесів в ОЕС України. Реєстратори аварійних подій, встановлені на електричних станціях та підстанціях мережі, здійснюють запис аварійних режимів, що виникають у безпосередній близькості до енергетичного об’єкта. Проте неможливість здійснення синхронізованих вимірювань та відсутність централізованої системи збору інформації з цих пристроїв накладають певні обмеження на їх застосування. Саме тому використання інформації, записаної реєстраторами аварійних подій для верифікації моделі енергосистеми, є ускладненим. Специфіка розглянутих систем накладає деякі обмеження на їх використання в процесі верифікації моделі.

Метою статті є розробка підходу до верифікації цифрової моделі ОЕС України з урахуванням доступних засобів моніторингу та особливостей їх використання. Підхід базується на порівнянні параметрів перехідного процесу зареєстрованого *WAMS* при виникненні збурення в ОЕС України з розрахунковими значеннями, отриманими при моделюванні аналогічного збурення (рис. 1). Його реалізація передбачає постійне спостереження за аваріями, що мають місце в енергосистемі. У разі виникнення збурення, аналіз якого може бути корисним при верифікації цифрової моделі та наявності *PMU* в енергорайоні, виконується збір первинної інформації від систем *SCADA/EMS* та *WAMS*. На першому кроці виконується налаштування цифрової моделі енергосистеми відповідно до параметрів доаварійного усталеного режиму, що був сформований за результатами оцінки стану на базі інформації від системи *SCADA/EMS* та представлений у форматі ЦДУ. З метою автоматизації процесу налаштування передаварійного режиму було розроблено інструмент, що конвертує дані з формату ЦДУ у формат, придатний для імпорту в програмне забезпечення, яке використовується для розрахунків [6].

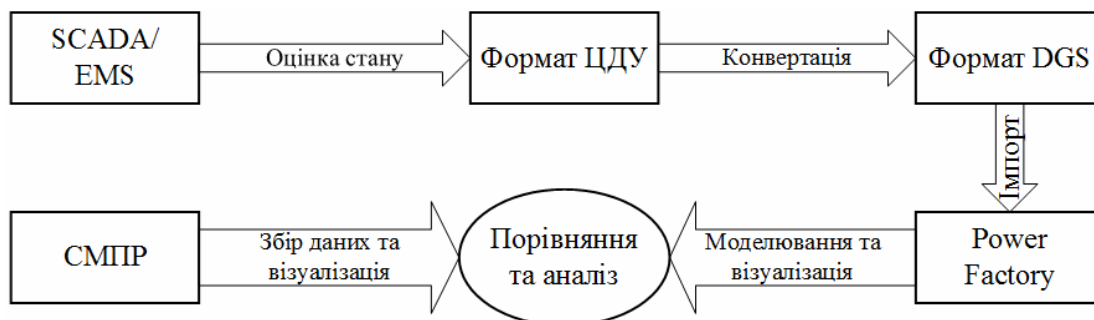


Рис. 1

На другому кроці створюється сценарій протікання збурення, що складається з окремих подій, які мали місце в енергосистемі. Типовими подіями, що моделюються, є виникнення короткого замикання (КЗ), вимкнення елементів мережі та блоків станцій. Після цьо-

го можна переходити до моделювання електромеханічних перехідних процесів. Отримані результати у вигляді графіків співставляються з графіками, побудованими з використанням даних від WAMS. За результатами порівняння можна судити про адекватність моделі енергосистеми та обирати шляхи її покращення.

Для ілюстрації запропонованого підходу використано цифрову модель ОЕС України, яка складається з 1110 вузлів номінальною напругою 110...750 кВ, 150 генераторів та 1294 ліній/трансформаторів. Усі генератори доповнено моделями автоматичних регуляторів швидкості та автоматичних регуляторів збудження (АРЗ) (рис. 2).

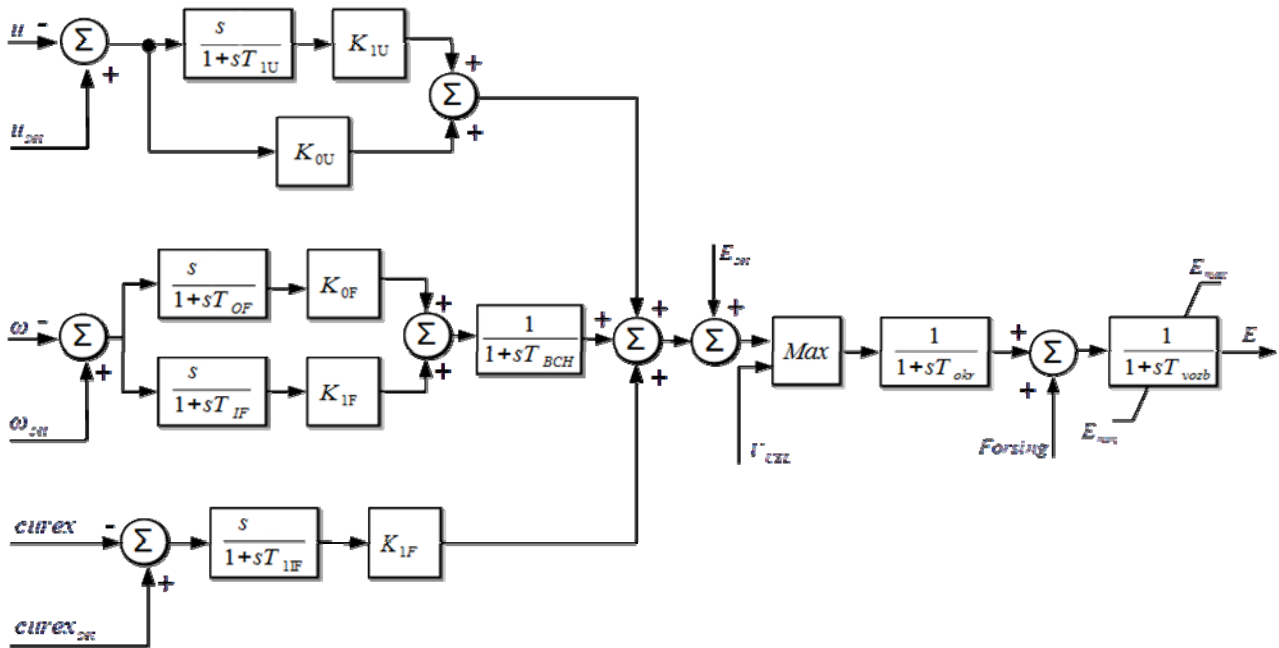


Рис. 2

Для прикладу застосування запропонованого підходу на рис. 3 а, 4 а та 5 а показано коливання активної потужності по трьох лініях мережі 750 кВ ОЕС України, побудовані з використанням інформації, отриманої від WAMS ( $P_{WAMS}$ ) для аварії, що мала місце в ОЕС України: «17 березня 2014 року о 21-56 ПЛ 750 кВ Хмельницька АЕС – Чорнобильська АЕС відключилася дією захисту з НАПВ. Одnocześnie на ПС Чорнобильська АЕС дією диференційного захисту шин відключилась секція 4 шин 750 кВ, при цьому ПЛ 750 кВ Чорнобильська АЕС – Київська залишилася під напругою з боку ПС Київська». На рис. 3 б, 4 б та 5 б показано розрахункові криві, отримані при моделюванні аналогічного збурення з використанням цифрової моделі енергосистеми ( $P_{МОДЕЛЬ}$ ). Для верифікації цифрової моделі було використано такі показники:

- частота коливань активної потужності лінії, що виникають після збурення ( $f=1/T$ );
- зміна активної потужності лінії ( $dP$ ).

Таблиця 1

Лінія	$dP_{WAMS}$ , МВт	$dP_{МОДЕЛЬ}$ , МВт	$\Delta dP$ , МВт	$\Delta dP$ , %
«Вінницька – Південноукраїнська АЕС»	363	371	8	2,2
«Західноукраїнська – Хмельницька АЕС»	79	68	-11	-16,2
«Західноукраїнська – Вінницька»	0	0	0	-

Таблиця 2

Лінія	$f_{WAMS}$ , Гц	$f_{МОДЕЛЬ}$ , Гц	$\Delta f$ , Гц	$\Delta f$ , %
«Вінницька – Південноукраїнська АЕС»	0,61	0,54	0,066	10,8
«Західноукраїнська – Хмельницька АЕС»	0,98	0,95	0,028	2,9
«Західноукраїнська – Вінницька»	0,63	0,54	0,092	14,6

Чисельне порівняння деяких параметрів зареєстрованих перехідних процесів та результатів моделювання наведено в табл. 1, 2.

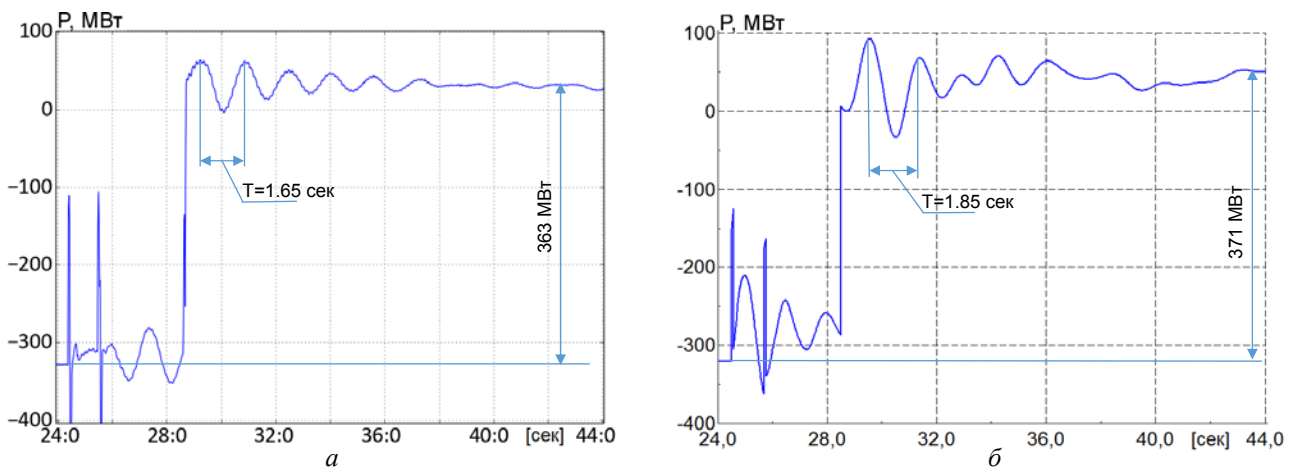


Рис. 3. Активна потужність по ПЛ 750 кВ «Вінницька – Південноукраїнська АЕС»:  
а –  $P_{WAMS}$ ; б –  $P_{МОДЕЛЬ}$

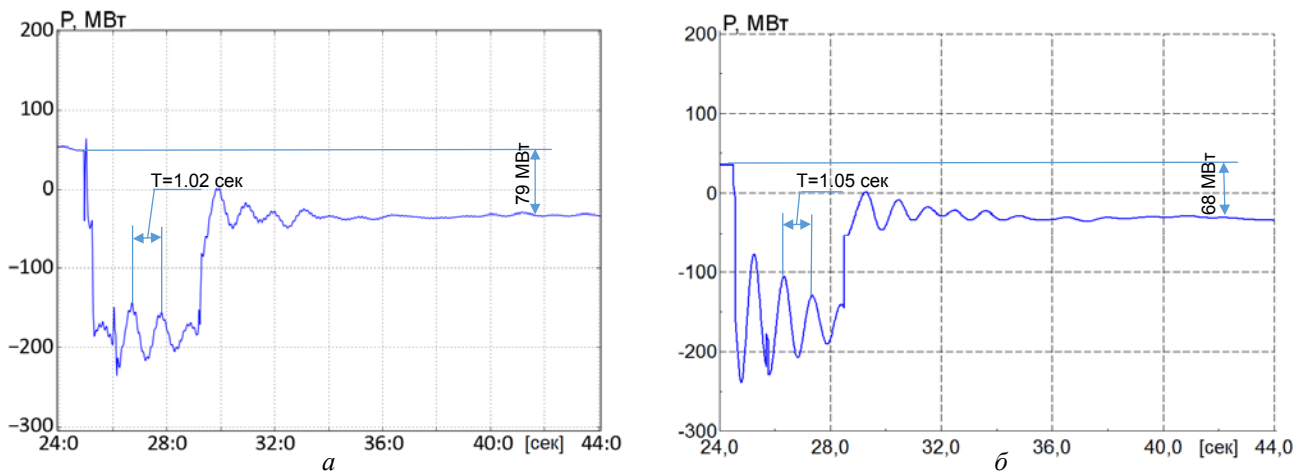


Рис. 4. Активна потужність по ПЛ 750 кВ «Західноукраїнська – Хмельницька АЕС»:  
а –  $P_{WAMS}$ ; б –  $P_{МОДЕЛЬ}$

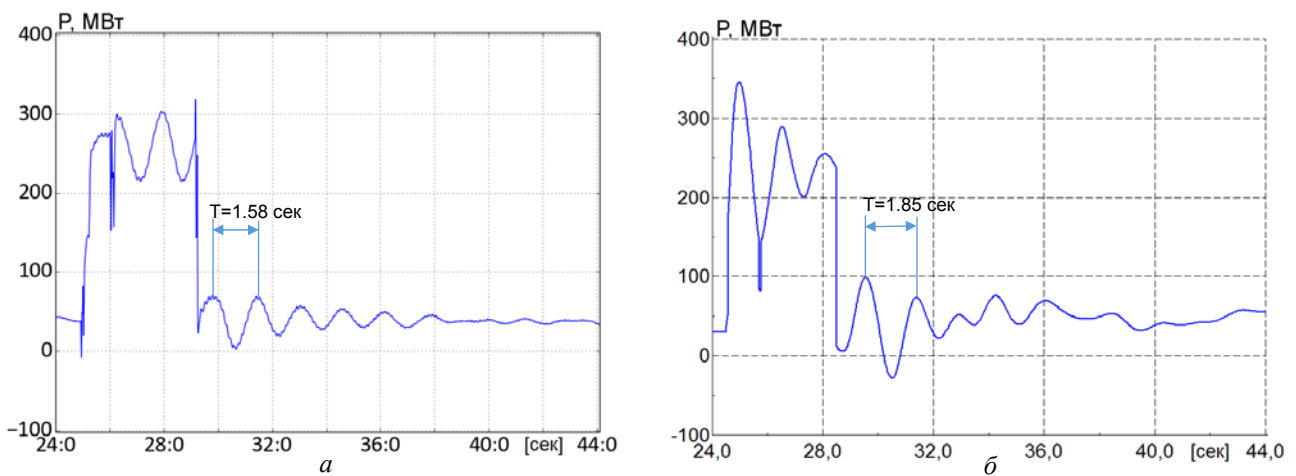


Рис. 5. Активна потужність ПЛ 750 кВ «Західноукраїнська – Вінницька»:  
а – дані  $P_{WAMS}$ ; б –  $P_{МОДЕЛЬ}$

Характер протікання зареєстрованого перехідного процесу співпадає з розрахунковим для всіх трьох ліній (рис. 3–5). Що стосується кількісних показників, то зміна перетоку активної потужності ліній в до- та післяаварійному ( $dP$ ) відрізняється на незначну величину. Так, для лінії «Вінницька – Південноукраїнська АЕС» зміна активної потужності склала 363 МВт за даними СМІР та 371 МВт за результатами моделювання. Розрахункові значення частоти коливань активної потужності для ліній «Вінницька – Південноукраїнська АЕС» та «Західноукраїнська – Вінницька» дещо відрізняються від зареєстрованих. Частота зареєстрованих та змодельованих коливань склала 0,61 та 0,54 Гц відповідно. Зазвичай коливання з частотою 0,05...2 Гц визначаються як міжсистемні [6]. У таких коливаннях можуть бути задіяні генератори ОЕС України та сусідніх енергосистем. Тому подібні похибки може вносити еквівалент ЄЕС Росії, що був використаний при моделюванні. Проте незважаючи на деякі неточності, можна констатувати, що запропонований підхід дає змогу верифікувати цифрову модель ОЕС України та порівнювати якісні та кількісні показники перехідних процесів, що протікають у реальній енергосистемі з розрахунковими.

1. Аюев Б.И., Герасимов А.С., Есипович А.Х., Куликов Ю.А. Верификация цифровых моделей ЕЭС/ОЭС // Электричество. – 2008. – № 5. – С. 2–7.
2. Павловский В.В., Ленга О.В., Уцаповський К.В., Зайченко В.Б. Расчеты устойчивости режимов энергосистем при замене систем возбуждения генераторов станций // Электрические сети и системы. – 2014. – № 2. – С. 3–12.
3. Стозній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф. Застосування засобів моніторингу перехідних режимів в ОЕС України при розв'язанні задач диспетчерського керування // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 23. – С. 147–155.
4. Kosterev D., Eto J., Yang S., Lesieutre B. Improving Reliability Through Better Models: Using Synchrophasor Data to Validate Power Plant Models // IEEE Power & Energy Magazine. – Vol. 12. – N 3. – May/June 2014.
5. <http://www.digsilent.de> – DIGSILENT GmbH.
6. Kundur P. Power System Stability and control / McGraw – Hill // New-York. – 1993. – 1176 p.

УДК 621.311.001.57

**В.В. Павловський**, докт. техн. наук, **О.В. Ленга**, асп.

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03380, Украина

#### **Формирование подхода к верификации динамической модели энергосистемы**

*Предложен подход к верификации динамической модели ОЭС Украины с учетом доступных средств мониторинга и особенностей их использования. Приведен пример верификации цифровой модели с использованием данных системы SCADA/EMS и WAMS для реального возмущения, которое имело место в ОЭС Украины. Библ. 6, рис. 5, табл. 2.*

**Ключевые слова:** энергосистема, переходные процессы, цифровая модель, верификация, WAMS.

**V.V. Pavlovskiy, O.V. Lengha**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **Forming of the approach to verification of power system dynamic model**

*The approach to the verification of dynamic model of IPS of Ukraine based on availability and features of the monitoring tools was proposed. The example of the verification of digital model using data of SCADA/EMS and WAMS of real disturbances that occurred in IPS Ukraine was given. References 6, figures 5, tables 2.*

**Key words:** power system, transients, digital model, verification, WAMS.

Надійшла 20.03.2015

Received 20.03.2015