

## СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ І ВІДОБРАЖЕННЯ ПОТУЖНОСТЕЙ І ФАЗОВИХ КУТІВ НАПРУГ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Включення на сумісну роботу окремих синхронізованих енергооб'єднань типу УСТЕ, ОЕС України, ЄЕС Росії та інших потребує більш якісних алгоритмів і систем управління генеруючими станціями і режимами системоутворюючих ПЛ і підстанцій (ПС) напругою 750; 500(400); 330; 220кВ. Означені проблеми вже вирішуються фахівцями декількох Інститутів НАНУ, НТУУ «КПІ», НЕК «Укренерго» [1, 2] згідно з державною програмою «Науково-технічні проблеми інтеграції енергетичних систем України в Європейську енергетичну систему» (ДР №0106U009489). Дослідження статті теж спрямовані на вирішення проблем означеної державної програми.

Мета статті – розробка пропозицій щодо визначення і відображення миттєвих потужностей і фазових кутів напруги за допомогою засобів LabVIEW та створення відповідних інформаційно-лічильних «комірок-тріад».

Теоретичні засади використання фазових кутів  $\delta_{ln}$  напруг ЕС в управлінні і відображенні її режимів отримані у [3, 4-8]. Особливістю роботи енергосистеми (ЕС) чи об'єднаних ЕС є те, що активна і реактивна потужність, яка виробляється і споживається, має суттєву залежність від трьох важливіших змінних:  $\omega$  - синхронної швидкості,  $U$  – напруги на шинах станцій, підстанцій,  $\delta$  – взаємних фазових кутів між напругами підстанцій  $U_1-U_2-U_n$ .

Аналіз параметрів і режимів ПЛ 220...750 кВ як структурних складових, що значно впливають на режими і надійність роботи енергосистеми (ЕС), показав наступне. Найповніше характеризує ПЛ формула, що зв'язує її власні параметри з параметрами навантаження  $P_x$ ,  $Q_x$  [9], тобто кутова характеристика:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{P_x}{P_{\text{нат}}} \lambda - \frac{\rho \cdot j \cdot l}{U_{\phi, n}} \sin \phi}{1 + \frac{\rho \cdot j \cdot l}{U_{\phi, n}} \cos \phi + \frac{Q_x}{P_n} \cdot \lambda}, \text{ або спрощена } \frac{P_x}{P_{\text{нат}}} = \frac{\sin \delta}{\sin \lambda},$$

де

$$P_{\text{нат}} = \frac{3U_{\phi, n}^2}{Z_e}, \quad (1)$$

де  $\delta$  – кут між векторами напруг на кінцях ПЛ або на кінцях її ділянки;

$$\lambda = \frac{\omega \cdot l}{v_{\text{хв}}} - \text{хвильова довжина ПЛ, розрахункове значення для ділянки} - \lambda_x \text{ визначається довжиною лінії } l_x, \text{ параметрами її індуктивностей } L \text{ і ємностей } C.$$

Виконана розробка принципів віртуального визначення фазових кутів напруг на ПС-750кВ НЕК «Укренерго» та їх відображення за допомогою програмного середовища LabVIEW, при

цьому авторам статті були надані такі вихідні дані:

- результати синхронізованих вимірів фазових кутів напруг засобами СМНР - приладами «Регіна - Ч» на ПС 750 кВ: «Зах. Укр.- Півд.Укр.», «Півд.Укр.- Донбаська»;
- фактична схема південно-західної частини ОЕС (див. рис.1) і дані телевимірювань активних і реактивних потужностей відповідного режиму за 15.04.08 комплексу «Космос», розробленого у ІЕД НАНУ.

Як новий спосіб визначення фазових кутів  $\delta_{1-n}$  повітряних ліній між 9-ма підстанціями (ПС) 750 кВ ОЕС в статті реалізовано віртуальне визначення  $\delta_{1-n}$  з використанням запропонованого програмного продукту LabVIEW [10]. При цьому використана спрощена формула визначення кута

$$\delta_{1-n} = \arcsin \frac{P_t \cdot \sin \lambda}{P_n}, \quad (2)$$

де  $P_t$  - поточна потужність ПЛ між підстанціями, постійна на інтервалі  $t \leq 1$ хв.,

$P_n = 2150$ МВт - натуральна потужність всієї ПЛ-750 «ПС Донбаська - ПС Альбертирша» і всіх її ділянок;

$\lambda$  - хвильова довжина, пропорційна довжині ділянок ПЛ-750 кВ між ПС-750кВ.

Значення потужностей  $P_t$  взяті з даних комплексу телевимірювання «Космос», рис.1, за 15.04.08, на 10 годин 29-30 хвилин, значення  $P_n$  і  $\lambda$  взяті з [8, 9]. Всі проміжні розрахункові значення виразу (3) надано у табл.1. Схема передачі потужності від РАЕС, ХАЕС до системоутворюючих ПС- 750 кВ наведена на рис.2. На ній показано напрями перетоків потужностей  $P_t$ , а також розрахункові значення кутів  $\delta$  на кожній ПС. Аналізуючи розрахункові дані, бачимо наступне. Значення кутів  $\delta$  зростає в напрямку від ПС Донбаська до РАЕС аналогічно зростанню, наданому комплексом телевиміру «Космос» (табл.1 стовпчики 2,3). Різниця розрахункового значення і телевиміру  $\Delta\delta = \delta_{\text{розн.}} - \delta_{\text{розн.}}$  надана у стовпчику 4.

Для уточнення розрахункових значень взаємних кутів напруг усіх підстанцій 750 кВ ОЕС була використана друга формула (3), в якій враховуються реактивні потужності навантажень і реакторів встановлених на ПС - 750. Значення кутів, отриманих за допомогою LabVIEW, калькулятора, а також програмного комплексу «Космос», наведені в табл. 1.

$$\delta = \arctg((tg \lambda \cdot P_t / P_n) / (1 + Q_2 \cdot tg \lambda / P_n)), \quad (3)$$

де  $Q_2$  – реактивна потужність на кінці ділянки ЛЕП.

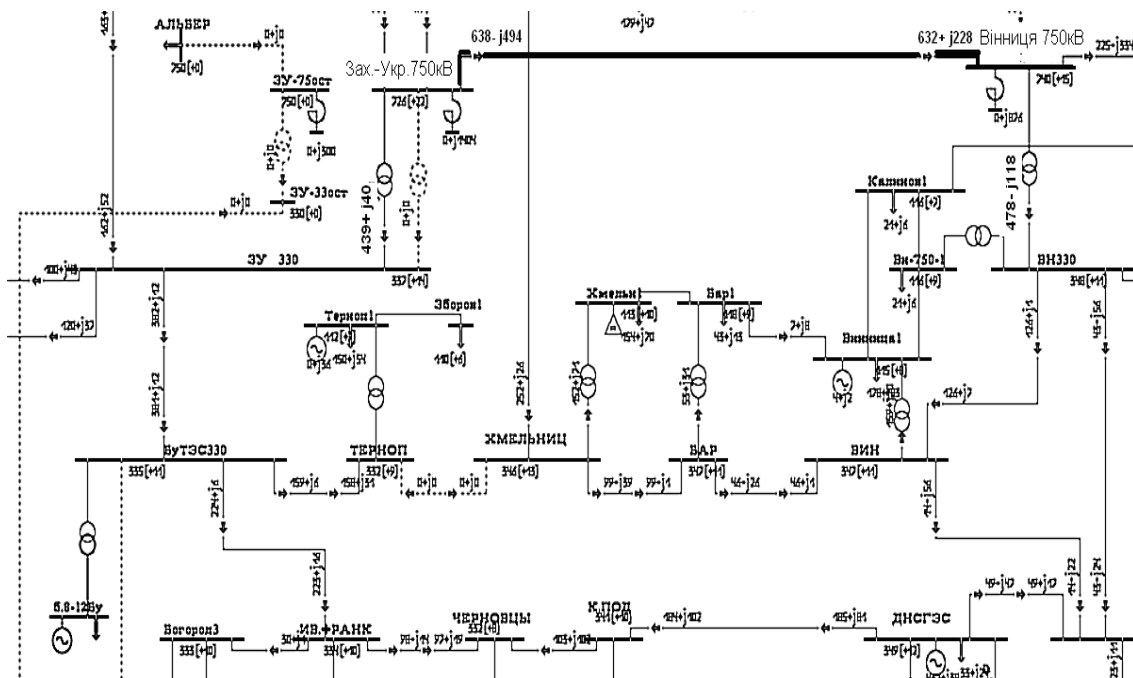


Рис.1. Фрагмент південно-західних електромереж ОЕС і їх потоків потужностей

Аналізуючи розрахункові дані, бачимо наступне. Значення кутів  $\delta$  зростає в напрямку від ПС Донбаська до РАЕС аналогічно зростанню, наданому ПК «Космос» (табл. 1, стовпчики 2, 8).

Різниця розрахункового значення і телевиміру  $\Delta\delta = \delta_{\text{косм.}} - \delta_{\text{розр.}}$  надана у стовпчику 4 табл.1. На п'ятьох ПС різниця значень невелика, не перевищує 0,84 град.ел., на підстанції Півд.-Укр., Вінниця, Зах.-Укр. вона становить 1,25-3 град.ел., що потребує окремого аналізу.

Розробка принципів відображення значень кутів  $\delta_{1-n}$  на ПС-750 кВ.

Покращення відображення режимів і стану енергооб'єднання ЕС і ОЕС є одною із складових удосконалення [5, 6] всього загального паливно-енергетичного комплексу, але найбільш важливим воно відноситься до систем управління і контролю енергооб'єднанням ЕС і ОЕС «від руки» загальносистемного автоматизованого диспетчерського управління (АСДУ). Тому в межах цієї статті розроблена процедура і обрано спосіб «відображення» визначених фазових кутів напруг на ПС-750 кВ за допомогою віртуальних приладів і програм LabVIEW [10]. Для прикладу на рис. 2 показана логіко-розрахункова схема, яка відображає реальні (телеметричні) дані поточних потужностей  $P_1$  і  $Q_2$ , за якими знайдено поточні значення кутів  $\delta_{1-n}$  на частині ПС-750 кВ. На нижня крива рис. 2 відображено поточні значення кутів на підстанціях, а верхня крива, яка може відображати можливі значення кутів  $\delta_{1-n}$  на ПС-750 кВ відповідні іншому, більш навантаженому режиму енергосистеми. Тобто в програмі передбачено моделювання декілька можливих режимів перетоків потужностей  $P_1$  і  $Q_2$  на окремих частинах ПЛ-750 кВ (між ПС) з відповідними розрахунковими значеннями  $\delta_{1-n}$ , відображеними на верхній кривій. Верхніх кривих може бути декілька: відповідним зимовим (максимальним) режимам навантаження ОЕС, або мінімальним (влітку), відповідним денному, або нічному навантаженню в окрему добу. Можна передбачити і спрогнозувати якісь аварійні режими в ОЕС та надати відповідні значення параметрів на «верхній кривій». Відображені на екрані монітора або диспетчерської зали поточний режим (на нижній кривій) і один з можливих (розрахункових) режимів на «верхній кривій» дозволять диспетчерові наглядно бачити і аналізувати співвідношення даних поточного режиму і вживати необхідних заходів щодо корегування управлінських дій.

Таблиця 1

Дані визначення кутів між напругами ПС-750 кВ, характеристик ліній та їх перетоків потужностей

Кути $\delta_{1-n}$ (град. ел.) напруги U підстанцій 750кВ					Дані повітряних ліній 750кВ, їх перетоків потужностей					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Підст. 750	Космос	Формула 2	$\Delta\delta$	Кальк. (форм.1)	Пов.лінія 750кВ	$\lambda$ - хв.довж	Акт.потужн. Pt	Pt/P <sub>нат</sub>	$\sin\lambda \cdot Pt/P_{\text{нат}}$	$\delta$ град. ел. (форм.1)
ДБ-750/500	4	3,2	-0,8	3,5	Запорож.-ДБ	0,23 рад	332 МВт	0,1544	0,0355	3
Запоріж.	7	6,7	-0,32	6,5	ДБ-ПДБ	0,247	596	0,2772	0,0685	4
Півд.-ДБ	8	8*	0,0	7,5	ЗАЕС-ПДБ	0,283	1095	0,5093	0,144	8,2
ЗАЕС	18	16*	-2	12,2	Дніпр.-Запорож.	0,128	758	0,3526	0,045	2,4
Дніпр.	10	8,7	-0,2	10,8	Дніпр - ЗАЕС	0,14	-1801	0,8377	0,117	7
Півд.-Укр.	13	10	-3	12,8	ПУкр.-Дніпр.	0,23	278	0,129	0,0297	2
Вінниця	15	13,3	-1,7	13,8	Вінниця-ПУкр.	0,2	225	0,1046	0,0175	1
Зах-Укр	22	20,85	-1,25	20,3	Зах.Укр.-Вінниця	0,38	632	0,294	0,112	6,5
РАЕС	26	26,84	0,84	26,5	РАЕС-Зах.Укр.	0,3	775	0,36	0,108	6,2

Аналогічну підсистему «відображення» режимів енергосистеми доцільно впровадити і на диспетчерських пунктах в мережах 330 кВ, 220 кВ, що значно зменшить навантаження на диспетчерів, облегчить їх працю.

Далі надано можливі варіанти відображення по кінцевих результатах визначення фазових кутів напруг на ПС-750кВ за другою формулою, з урахуванням активних і реактивних потужностей перетоків по ПЛ - 750.

На екрані (рис.2) бачимо значення фазових кутів напруг в цифрах на кожній ПС. Конкретна

точка графіка має координати «ПС - значення кутів  $\delta_{1-n}$  на шкалі». Нижня крива побудована за даними  $(P_i, Q_2, \lambda)$  розрахункової схеми, зображеної в нижній частині рисунка, де на верхніх прапорцях дані пробного розрахунку. При цьому не враховувалась генерація Запорізької АЕС і Хмельницької АЕС. Нижня крива, яка відображає значення кутів  $\delta_{1-n}$  на означених ПС-750 кВ відповідні іншому, більш навантаженому (зимовому) режиму енергосистеми, з іншими значеннями  $(P''_i, Q''_2, \lambda'')$ .

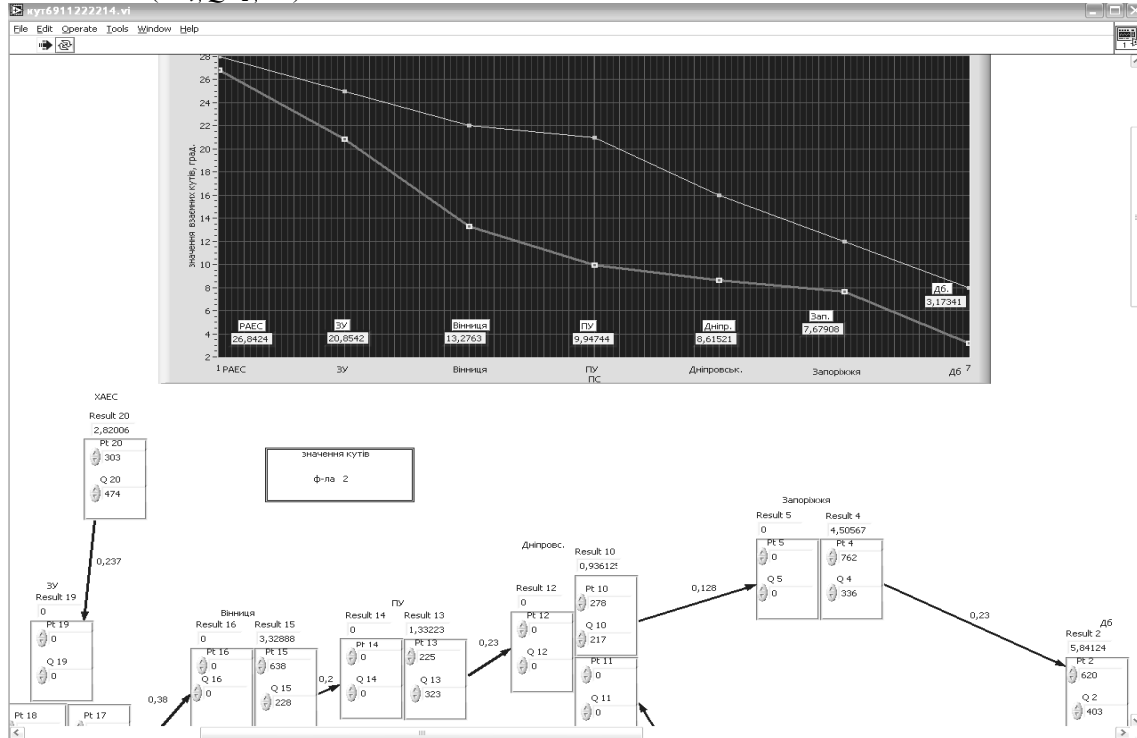


Рис. 2. Перший варіант відображення даних кутів  $\delta_{1-n}$  і режиму ПЛІ-750кВ

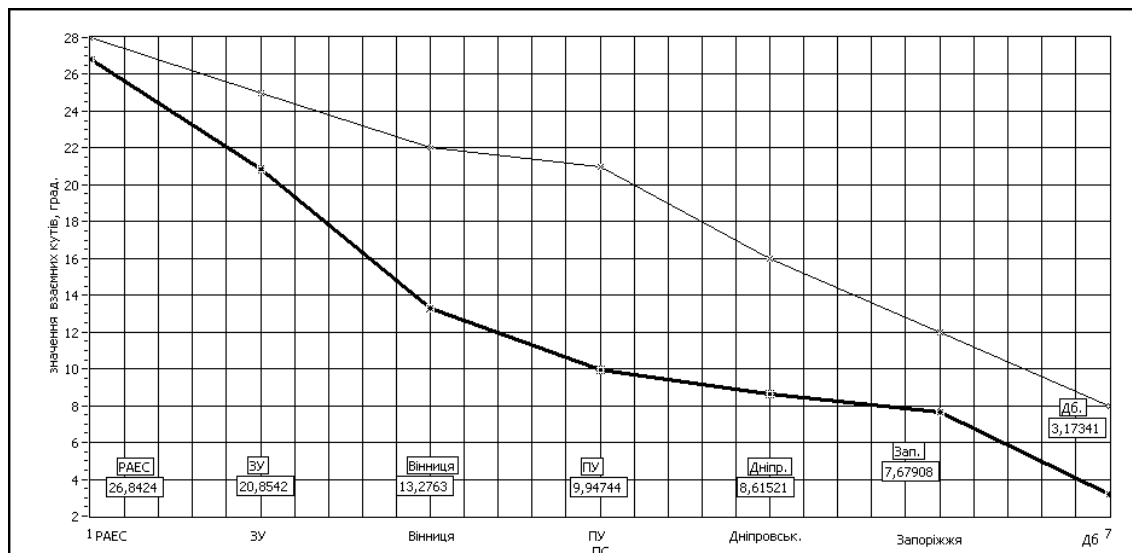


Рис. 3. Графік можливих значень кутів  $\delta_{1-n}$  напруг ПС-750кВ

На екрані (рис. 3) відображені тільки значення фазових кутів напруг означених ПС-750кВ відповідно до даних  $P_i, Q_2, \lambda$  розрахункової схеми, але представлені в іншому масштабі.

На фрагменті вікна (рис. 4) відображені значення фазових кутів напруг  $\delta_{1-n}$  означених ПС-750кВ трьох режимів ПЛ: на нижньому графіку – мінімальні літні, верхньому – прогностні максимальні значення. На середньому – значення поточного режиму (можливо оптимального) з конкретними цифровими даними. Прикладна програма дозволяє змінювати координати по шкалі всіх точок графіків,

тобто процес відображення може бути повністю автоматизованим і видавати підказки диспетчерам (а також сигнали системним регуляторам  $P_i$  і  $Q_2$ ). Такі можливості забезпечать підтримку АСУ ТП в оптимізації режимів генерації і передачі електроенергії по ПЛІ- 750кВ.

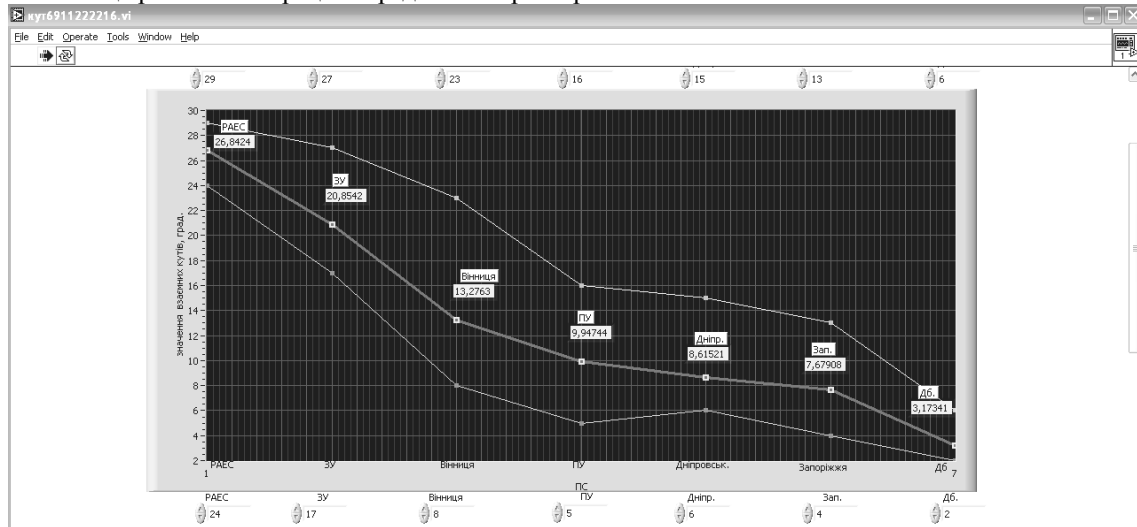


Рис. 4 Другий варіант відображення даних кутів  $\delta_{1-n}$  напруг ПС 750 кВ

На екрані рис. 5 нижня крива побудована за розрахунковими даними, відповідними рис.2, а верхня крива відображає інший режим і може бути корегована за змінними значеннями  $P_i$ ,  $Q_2$ ,  $\lambda$ , які може задавати диспетчер.

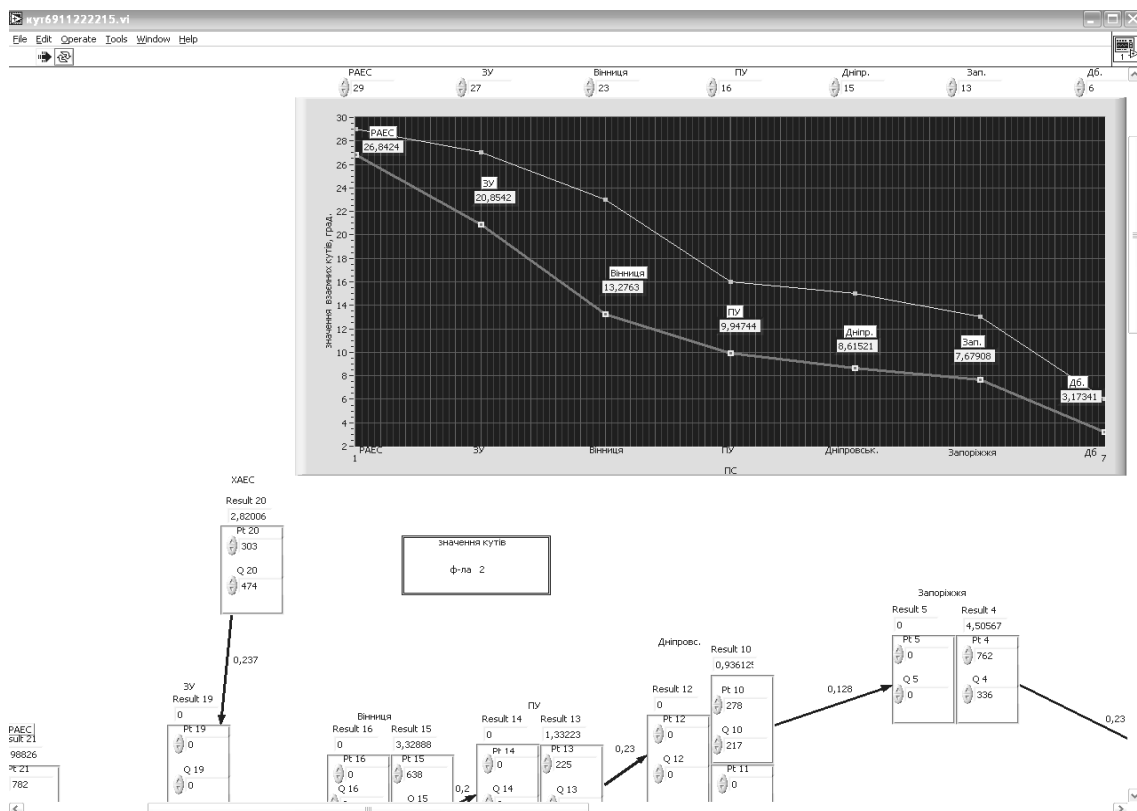


Рис. 5 Третій варіант відображення даних кутів  $\delta_{1-n}$  і режиму ПЛ750 кВ

Як канали передачі даних між ПС-750 кВ і центральним диспетчерським пунктом (ЦДП) планується використання волоконно-оптичних каналів (ВОК) систем зв'язку типу ВОСП-480 вітчизняного виробника ВАТ «Нептун», або аналогічних каналів ВОК з кращими техніко-економічними характеристиками інших виробників.

Принципи побудови і технічні характеристики ВОСП-480 ґрунтуються на використанні оптичних кабелів, відповідних рекомендаціям G.651- G.654 МСЕ-Т, для ліній зв'язку міст, областей, на магістральних лініях. Стандартне одномодове волокно з незміщеною дисперсією класифікується стандартом G.652 (широко поширене з 1983 року). Його параметри оптимізовані для діапазону довжин хвиль 1,31 мкм, у якому волокно має нульову хроматичну дисперсію й мінімальне згасання. Діаметр світловедучої жили волокна G.652 дорівнює 9 мкм, а оболонки –  $125 \pm 2$  мкм. Це волокно використовується для однохвильової й багатохвильової передачі (спектральне ущільнення), у тому числі в діапазоні довжин хвиль 1,55 мкм і забезпечує передачу інформації зі швидкостями до 10 Гбіт/с на середній відстані (до 50 км). Використання волокна G.652 при більших швидкостях передачі вимагає ускладнення кінцевої апаратури, що призводить до значних фінансових витрат.

Стандарт G.653 поширюється на одномодове волокно зі зміщеною нульовою дисперсією в області  $\lambda = 1,55$  мкм. Це волокно має нульову дисперсію в області мінімальних втрат волокна, що досягається за рахунок більш складної структури світловедучої жили, а саме спеціально заданого розподілу коефіцієнта переломлення по діаметру жили. Волокно типу G.653 використовується в протяжних магістральних широкосмугових лініях і мережах зв'язку, воно забезпечує передачу інформації на кілька сотень кілометрів зі швидкостями до 40 Гбіт/с. Однак по ньому можна передавати тільки один спектральний канал інформації.

Для синхронізованого виміру взаємних фазових кутів напруг в вузлах енергосистеми (підстанцій 750 кВ) пропонуємо метод з використанням штатної оптично-волоконної лінії зв'язку. Метод відрізняється тим, що опорна відмітка часу (імпульс) відправляється з умовного центрального вузла енергосистеми по оптично-волоконному кабелю (ОВК) по всіх напрямках до підстанцій 750 кВ. Враховуючи те, що затримка розповсюдження імпульсу високо стабільна в широкому діапазоні температур (0,0025%), будемо вважати, що вона залежатиме тільки від довжини оптично-волоконної лінії. Остання нам відома достатньо точно. Значення кожної окремої затримки може бути визначено відомими методами та введено в формулу алгоритму обчислень. У випадку, коли у віддалений вузол від центрального приходять декілька імпульсів, за кінцеве значення приймається їх середнє з ваговими коефіцієнтами. Наведемо для уточнення вищезазначеного деякі зауваження.

Затримка сигналу у оптоволоконному кабелі – 5 мкс/км. Для розрахункової довжини ОВК 400 км вона складе 0,002 с. Температурна залежність затримки в діапазоні температур  $-20 \dots +70^\circ\text{C}$  складає 0,125 нс/км. Відносне значення нестабільності в цьому ж діапазоні температур на 1 км:  $0,125/5000 = 0,0025\%$ .

В подальшому цю похибку можна буде мінімізувати, знаючи функціональну залежність затримки від температури та ввівши її як множник в коефіцієнт перетворення при обчисленні кінцевого значення. Слід зазначити, що це не єдина складова загальної похибки. Похибку буде вносити апаратне відтворення самого імпульсу та його вимірювання. Вимірювання часових інтервалів за допомогою стандартних приладів (наприклад, частотомірами) дає похибку такого ж порядку, а то й на порядок (порядки) краще. Вимірювання часової затримки можна виконати також за допомогою спеціалізованих пристроїв, які конкретно розробляються під дане завдання. Вимірювання частотомірами може бути автоматизоване за допомогою приєднання останніх до комп'ютера через інтерфейс IEEE488.

Структурна схема виміру взаємних кутів з використанням ОВК і середовища LabVIEW показана на рис. 6.

Для оптимального вибору інформаційної структури вимірювання, передачі і використання фазових кутів  $\delta$ ,  $\delta_{1-n}$ , виконано теоретичне порівняння за показниками резервування та зв'язності різних структур систем і схем електрозв'язку: ієрархічних, ланцюжкових, коміркових, радіальних, стільникових, однорідних, неоднорідних, багатозв'язаних і їхніх комбінацій (рис. 7).

Найбільш розповсюджена структура електрозв'язку – ієрархічна має суттєвий недолік. Її «центральна гілка», як за правило немає паралельних ланцюгів "навантаженого резервування", бо збудована значно раніше розгалужених гілок усіх рівнів, тому вона не здатна витримувати повне допустиме навантаження гілок. Зв'язність  $C$  у кожній схемі, згідно з [11], можна визначити за виразом:

$$C = \frac{k}{k_{\max}} = \frac{2(m-n+1)}{(n-1)(n-2)},$$

де  $m$  – число гілок;

$n$  – число вузлів (телефонних станцій);

$k = m(n-1)$  – кількість незалежних контурів,  $m_{\max} = n(n-1)/2$ ;

$k_{\max} = m_{\max} - (n-1)$  – максимально-можлива кількість контурів.

Другий теоретичний висновок про те, що кращі показники по резервуванню і зв'язності, тобто надійності, мають стільникові ( $z$ ), коміркові ( $a, \epsilon$ ) види структур (рис.7), тому що їх вузли з'єднані і вертикальними, і горизонтальними гілками, які і забезпечують більш надійну передачу даних і повідомлень між вузлами. Так, система у вигляді трикутника із джерелами, що генерують інформацію у вершинах, і гілками  $Z$ , рис.7 *a*, має зв'язність  $C=1$  і забезпечить постачання інформації з трьох вузлів при відключенні одного із трьох джерел, або розриві на одній з гілок. В трикутній схемі при нарощуванні вузлів до 4-х (див.пунктир, рис.7*a*) кількість можливих гілок зростає до  $m = 6$ , а показник зв'язності (надійності) залишається  $C=1$ .

Виходячи з цього доцільно створити з реальних ліній зв'язку НЕК «Укренерго» і віртуальних приладів і програм LabVIEW «комірки-тріади». На практиці створити «комірки-тріади» можливо на основі диспетчерських пунктів на ПС330/750кВ, зв'язаних наявними каналами передачі даних, рис. 8.

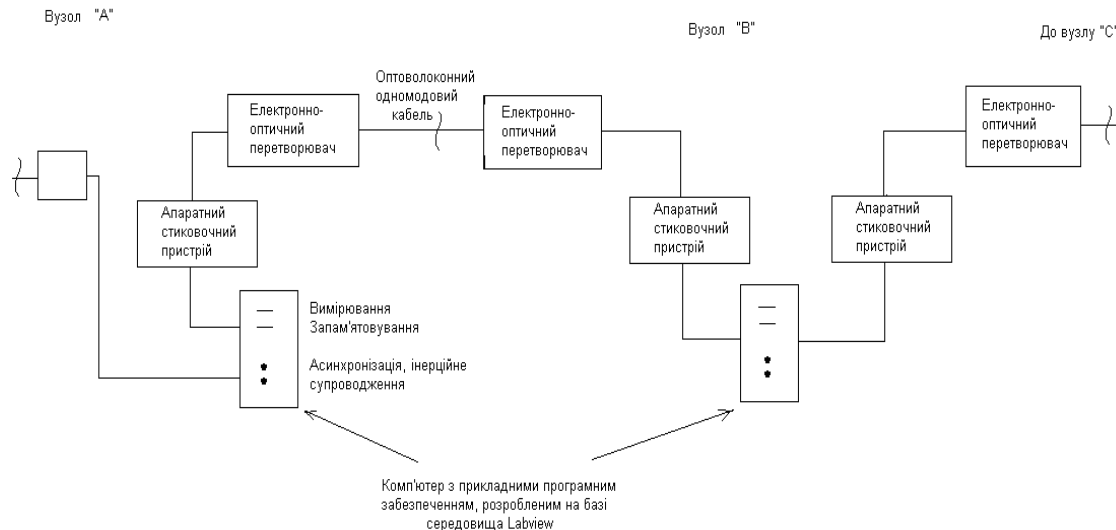


Рис. 6. Структурна схема виміру взаємних кутів за допомогою комп'ютерів і оптоволоконного кабелю по лініях 330/750 кВ

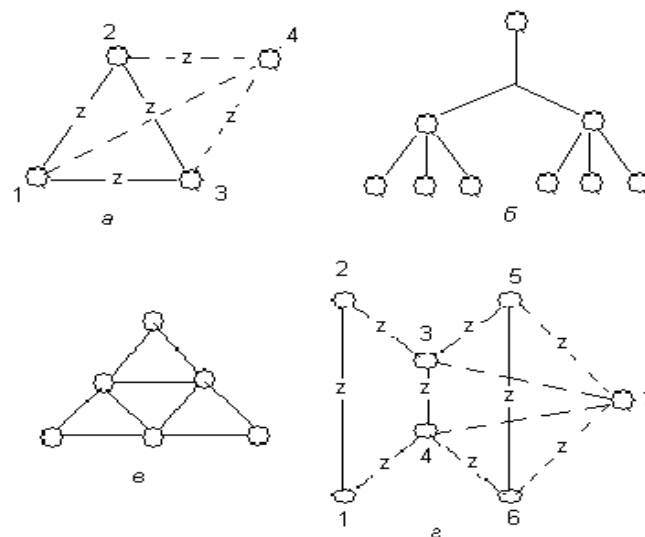


Рис. 7. Види деяких структур зв'язку і електричних схем:  
*a, в*, - коміркові, *б*- ієрархічна, *г* - стільникова

Наприклад: Перша «тріада» – ПС РАЕС – Зах.Укр. – ХАЕС, зв'язані волоконно-оптичним кабелем. Друга «тріада» – ПС Вінниця – ЦДП НЕК «Укренерго» – ПС ПУ АЕС (ПС 330кВ Одеса), зв'язані каналами НЕК «Укренерго». Третя «тріада» може бути створена, якщо здійснити зв'язок ПС ПУ АЕС (ПС 330 кВ Одеса) – ПС ЗАЕС – ЦДП НЕК «Укренерго», рис. 8, де на фоні ліній електропередач пунктиром відображені інформаційно-обмінні та обчислювальні «комірки-тріади».

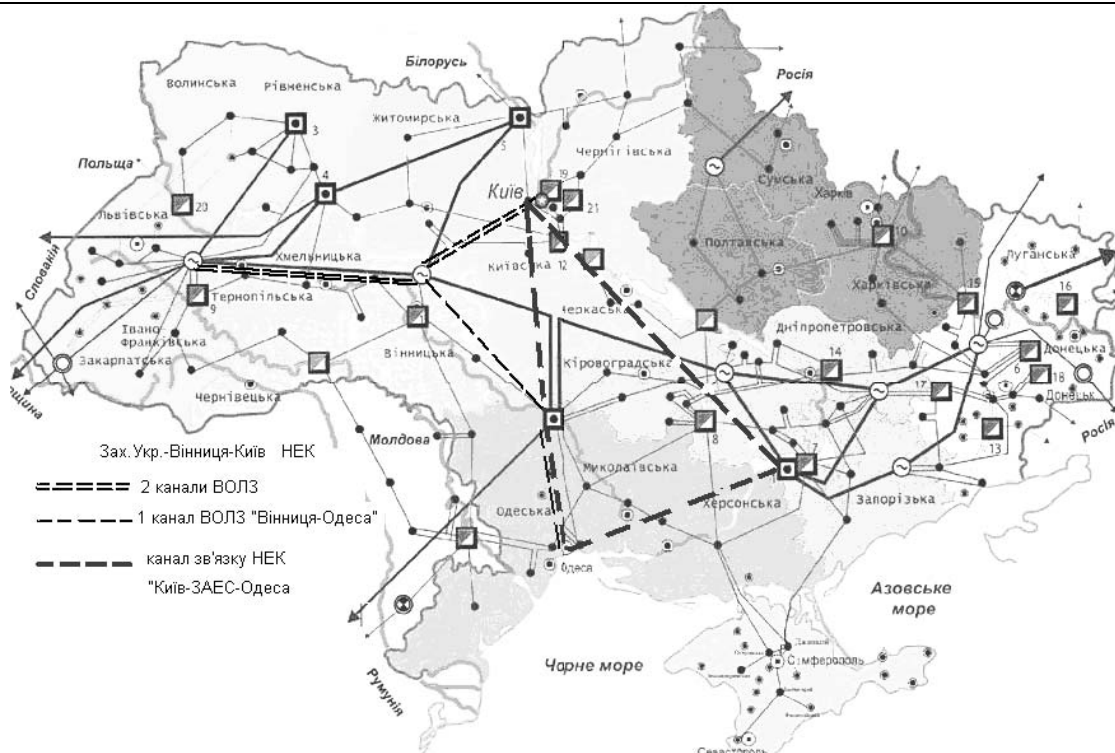


Рис. 8. Лінії зв'язку НЕК «Укренерго»

### Висновки

1. Визначення кутів векторів напруг ПС, з точністю датчиків напруги або потужності 0,2...0,3%, і значно точніших віртуальних приладів LabVIEW з використанням волоконно-оптичних каналів з незначною затримкою сигналу 5мкс/км(на 400 км - 0,002 с), і незначною відносною температурною нестабільністю 0,0025%, забезпечить вимірювання кутів напруг  $\delta$  практично з похибкою первинних датчиків  $\Delta\delta$  не більше  $\pm 0,5$ град.ел., достатньою для їх використання в алгоритмах розрахунків і управління режимами енергосистем. Зокрема, доцільне використання інтегральних значень кутів в розрахунках і оптимізації усталених режимів енергосистем і видачі підказок керуючому персоналу.
2. Миттєві значення кутів напруг, відображених на моніторах диспетчерських пунктів ПС і ЦДП, можливо використовувати в реальному часі у задачах управління АСДУ і автоматичному корегуванні уставок спрацювання протиаварійної автоматики. Для цього потрібно створити по вузлах швидкодіючі інформаційно-обмінні та обчислювальні «комірки-тріади» і як канали зв'язку використати штатний волоконно-оптичний кабель (кабелі) енергосистеми, а ще доцільніше використати найшвидші канали Інтернет з технологією 3G.

### Література

1. А.с. 1783452 СССР МКИ G01R 25/00. Способ определения угла сдвига фаз между напряжениями в двух узловых точках электрической сети / Ленчевский Е.А., Туваржиев В.К. и др. – Б.И. – №47. – 1992.
2. Авраменко В.Н. Про використання синхронізованих віддалених векторів напруги для оцінки рівня стійкості енергосистеми / Юнієва Н.Т., Сангінова О.В. // Праці ІЕД НАНУ.- 2007.- Зб. №4.- С.11-15.
3. Авраменко В.Н. Развитие методов и программных средств моделирования сложных: электроэнергетических систем для анализа устойчивости и аварийных режимов /Крылов В.А./ Праці ІЕД НАНУ.- 2002.- Зб. №3(3).- С.19-27.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электросистемах //М.: «Высшая школа». 1970.- 471с.
5. Ленчевський С.А. Відображення поточного режиму роботи енергосистеми при застосуванні запропонованого методу телевиміру кута  $\delta_{1,2}$  між векторами вузлових напруг/Туваржієв В.К. Олійник К.Л. // Проблеми загальної енергетики – 2003. - №9. – С. 67-71.



6. Туваржієв В.К. Система телевиміру фазового зсуву напруг двох вузлових точок (підстанцій) енергосистеми / Ленчевський Є.А.// Проблеми енергозбереження. – 1994. - №2-3. – С.74- 80.
7. Туваржієв В.К. Разработка программных и технических средств системы управления энергопотребителями по проводам ЛЭП / Ленчевский Е.А., Олейник К.Л. // Труды конф. Автоматика-98, НТУУ КПИ (ч.1). Киев.- 1998.- С. 114-313.
8. Справочник по проектированию СЭС / Под редакцией С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро// М.: Энергоатомиздат.- 1985. - 349с.
9. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. - Л.: Энергоатомиздат, Л.О.- 1990. - 176 с.
10. Жарков Ф.П., Каратаев В.В. и др. Использование виртуальных инструментов LabVIEW // М.: Солон-Р, Радио и Связь, Горячая линия - Телеком. -1999.- 268с.
11. Бушуев В.В. Динамические свойства электроэнергетических систем // М.: Эргоатомиздат.- 1987.- 120 с.