



«АНАЛІЗ ТА МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЗА ЧАСТОТОЮ»

Відділ моделювання електроенергетичних об'єктів та систем

Науковий консультант – д.т.н., академік НАН України Кириленко О.В.

Доповідач – к.т.н., с.н.с. Стелюк А.О.

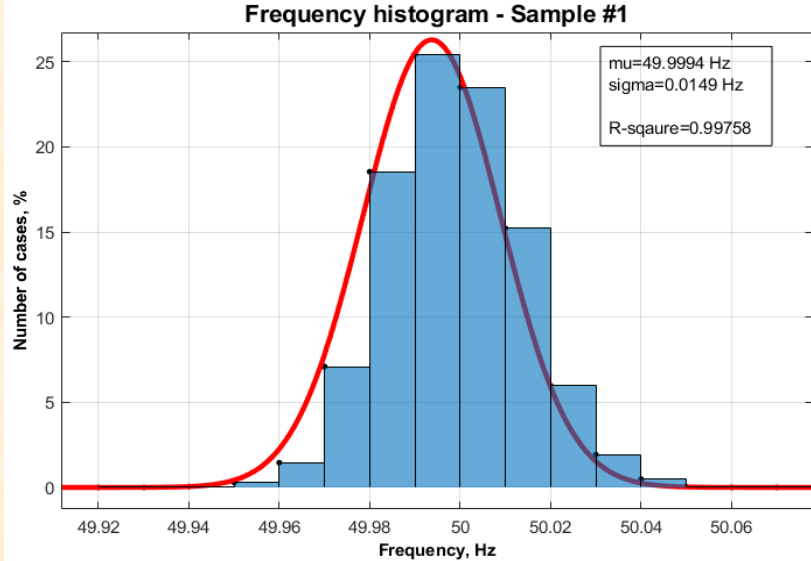


- ▶ **Інтеграція ОЕС України** до енергооб'єднання європейських країн ENTSO-е.
- ▶ **Інтеграція електростанцій на відновлюваних джерелах енергії** (насамперед, сонячних та вітрових) в структуру генеруючих потужностей ОЕС України.
- ▶ **Забезпечення необхідних резервів** нормованого первинного та автоматичного вторинного регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України відповідно до вимог ENTSO-е.
- ▶ **Забезпечення надійної роботи ОЕС України** за рахунок узгодження роботи систем протиаварійного керування за частотою та частотних автоматик енергоблоків вітчизняних АЕС.

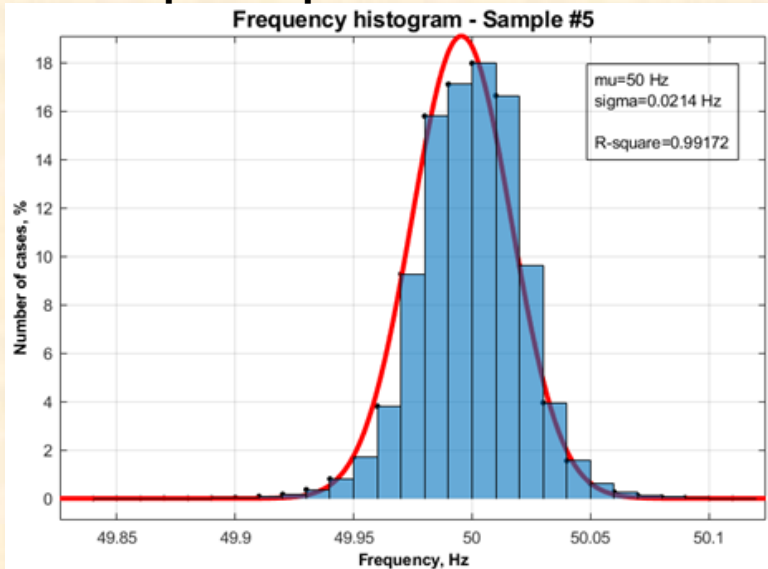


Аналіз частоти в ОЕС України

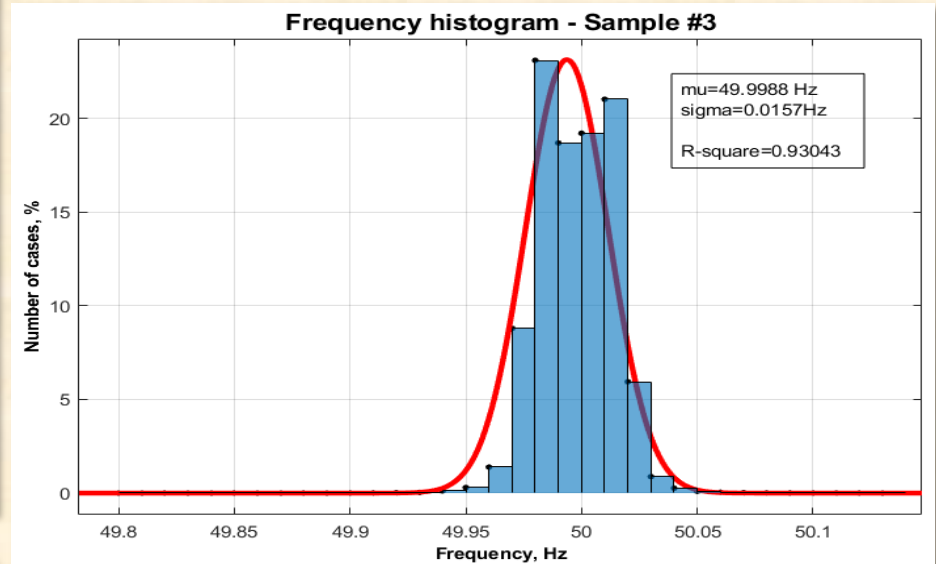
Синхронна робота з ЄЕС/ОЕС



Синхронна робота з ENTSO-E



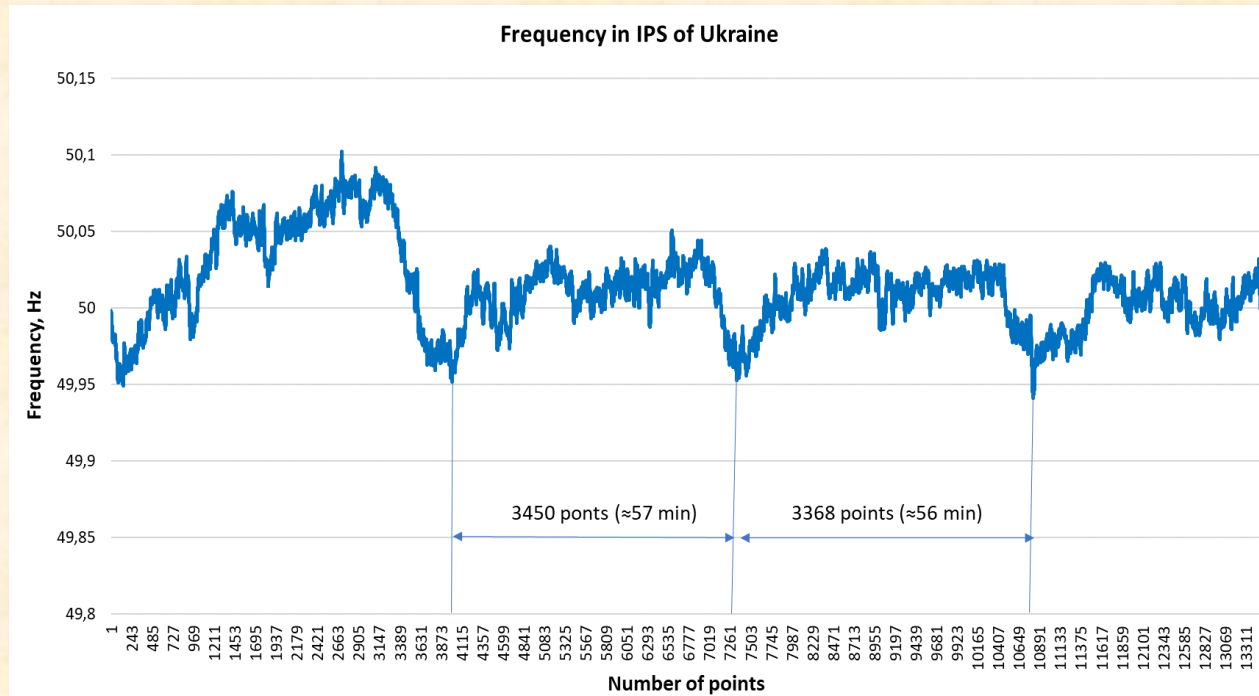
Ізольована робота ОЕС України



Статистичний аналіз даних реєстрації частоти:

- максимальне і мінімальне значення частоти;
- середнє значення частоти;
- середньоквадратичне відхилення;
- побудова гістограм для відповідних вибірок частоти.

Аналіз частоти в ОЕС України



№ п/п	Режим ОЕС України	Вибірка	Показники зміни частоти, Гц			
			Макс. значення $f_{\max}$, Гц	Мін. значення $f_{\min}$, Гц	Середнє значення μ , Гц	Середньоквадратичне відхилення σ , Гц
1	Паралельна робота з ЄЕС/ОЕС	Вибірка №1	50,0629	49,927	49,9994	0,0149
		Вибірка №2	50,065	49,938	49,9992	0,0151
2	Ізольована робота	Вибірка №3	50,125	49,806	49,9988	0,0157
		Вибірка №4	50,145	49,865	50,0016	0,0204
3	Синхронна робота з ENTSO-E	Вибірка №5	50,111	49,842	50	0,0214

Ідентифікація частотних параметрів ОЕС



Зміна потужності покриття в ОЕС1

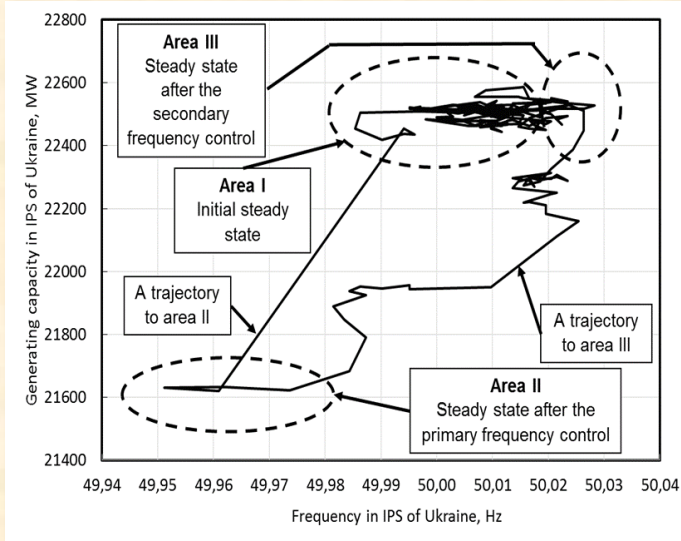
$$\Delta P_{\text{покp}}^{\text{OEC1}} = P_{\text{покp1}}^{\text{OEC1}} - P_{\text{покp0}}^{\text{OEC1}}$$

Зміна частоти в об'єднанні ОЕС1-ОЕС2

$$\Delta f = f_1 - f_0$$

Зміна сальдо перетікання з боку ОЕС2

$$\Delta P_{\text{сд}}^{\text{OEC2}} = P_{\text{сд1}}^{\text{OEC2}} - P_{\text{сд0}}^{\text{OEC2}}$$



**Зміна потужності покриття
залежно від частоти**

Крутизна с.ч.х. ОЕС1-ОЕС2

$$k_{\Sigma}^{\text{OEC1-OEC2}} = \Delta P_{\text{покp}}^{\text{OEC1}} / \Delta f$$

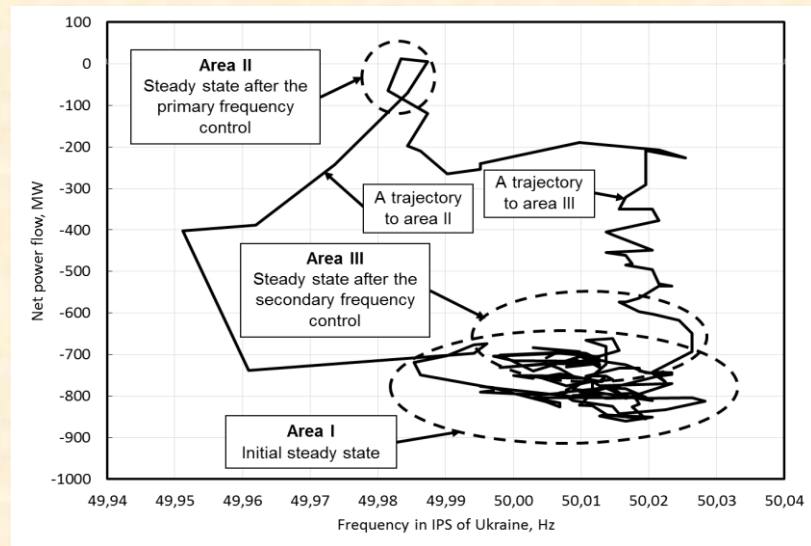
Крутизна с.ч.х. ОЕС2

$$k_{\Sigma}^{\text{OEC2}} = \Delta P_{\text{сд}}^{\text{OEC2}} / \Delta f$$

Крутизна с.ч.х. ОЕС1

$$k_{\Sigma}^{\text{OEC1}} = k_{\Sigma}^{\text{OEC1-OEC2}} - k_{\Sigma}^{\text{OEC2}}$$

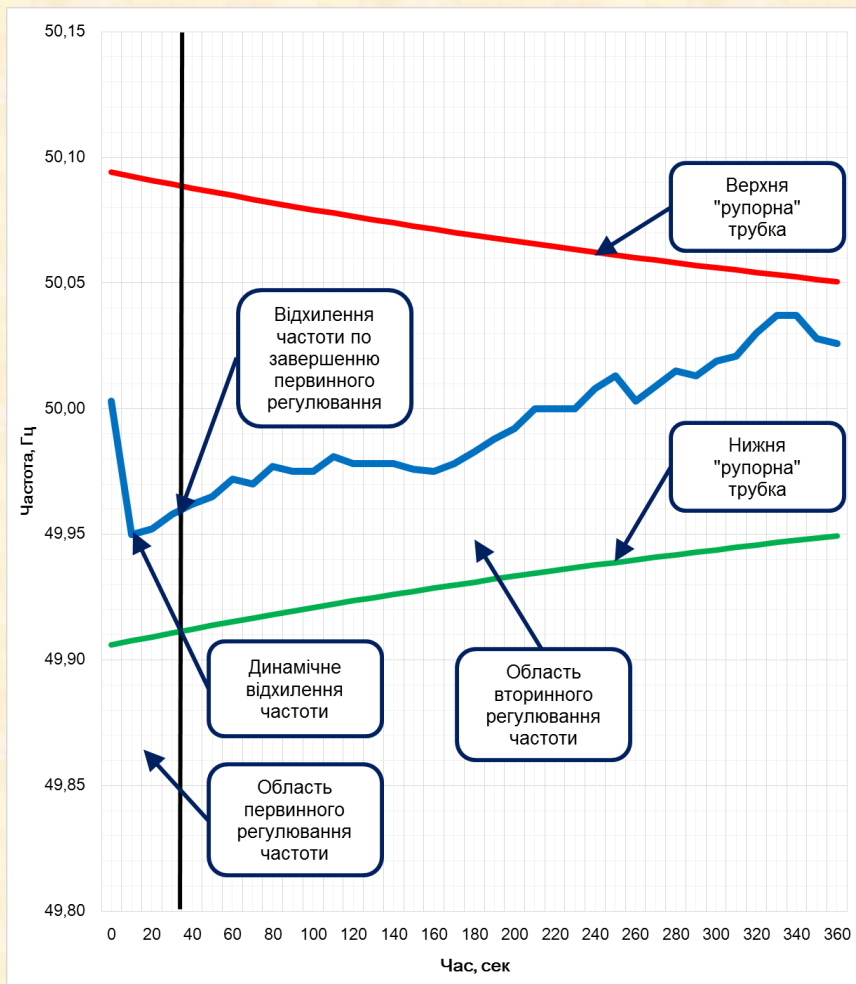
**Зміна сальдо перетоків залежно від
частоти**



Ідентифікація частотних параметрів ОЕС



Збурення – відключення енергоблоку № 6 на Запорізькій АЕС



Зміна частоти в ОЕС України

Коефіцієнти крутизни статичних частотних характеристик ОЕС/ЄЕС

Крутизна с.ч.х. ЄЕС/ОЕС

$$k_f^{\text{ЄЕС/ОЕС}} = 21463,4 \frac{\text{МВт}}{\text{Гц}}$$

Крутизна с.ч.х. ОЕС України

$$k_f^{\text{Укр}} = 3146,3 \frac{\text{МВт}}{\text{Гц}}$$

Крутизна с.ч.х. інших ОЕС

$$k_f^{\text{ОЕС}} = 18317,1 \frac{\text{МВт}}{\text{Гц}}$$

Рівняння «рипорних» трубок

$$H(t) = \begin{cases} 50 \pm 0,094e^{-t/581,4} & \text{для } t < 900\text{с} \\ \pm 20 \text{ мГц} & \text{для } t \geq 900\text{с} \end{cases}$$

Узагальнена модель САРЧП ОЕС України



Системна частина САРЧП

Відхилення частоти

$$\Delta f = f_{\phi} - f_{зд}$$

Відхилення сальдо перетікання

$$\Delta P_{сд} = P_{сд.ф} - P_{сд.зд}$$

Помилка регулювання області

$$ACE = \Delta P_{сд} + K_{\chi} \Delta f$$

Позапланова складова активної потужності

$$P_{пзпл}^{укр} = K_P ACE + K_I \int_{t_1}^{t_2} ACE dt$$

Позапланова складова активної потужності на регулюючі станції

$$P_{пзпл i} = \alpha_i P_{пзпл}^{укр}$$

Станційна частина САРЧП

Зміна потужності регулюючої станції

$$\Delta P_{e/ст} = K_{\chi K} \Delta f + P_{пзпл i} - \sum_{j=1}^m \Delta P_{т. j}$$

Позапланова складова активної потужності

$$P_{пзпл}^{e/ст i} = K_P^{АРП} \Delta P_{e/ст} + K_I^{АРП} \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_{e/ст} dt,$$

Позапланова складова активної потужності на окремий регулюючий агрегат

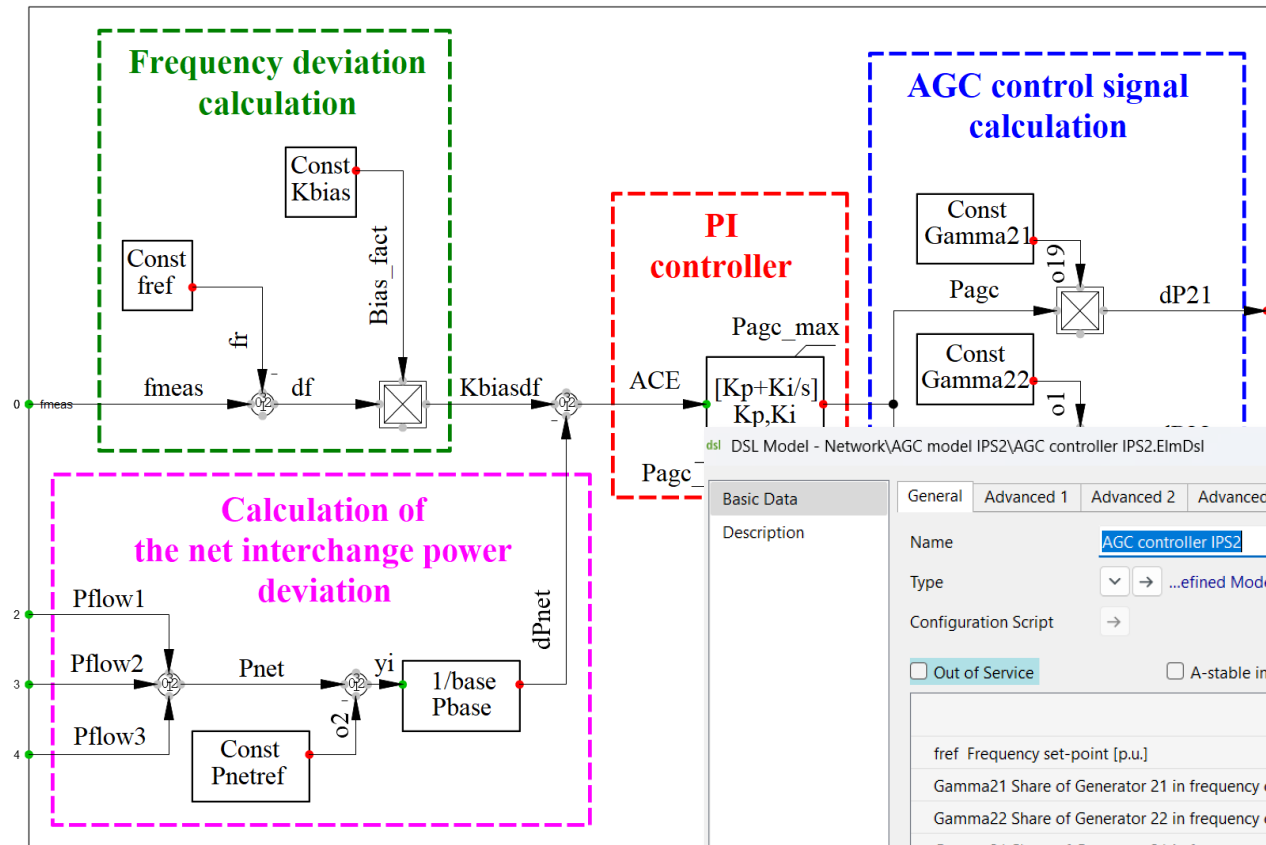
$$\Delta P_{зд}^{\Gamma-i-j} = \beta_{ij} P_{пзпл}^{e/ст i}$$

$$P_{пзпл}^{e/ст i} = \sum_{j=1}^m \Delta P_{зд}^{\Gamma-i-j}$$



Реалізація моделі САРЧП в ПЗ

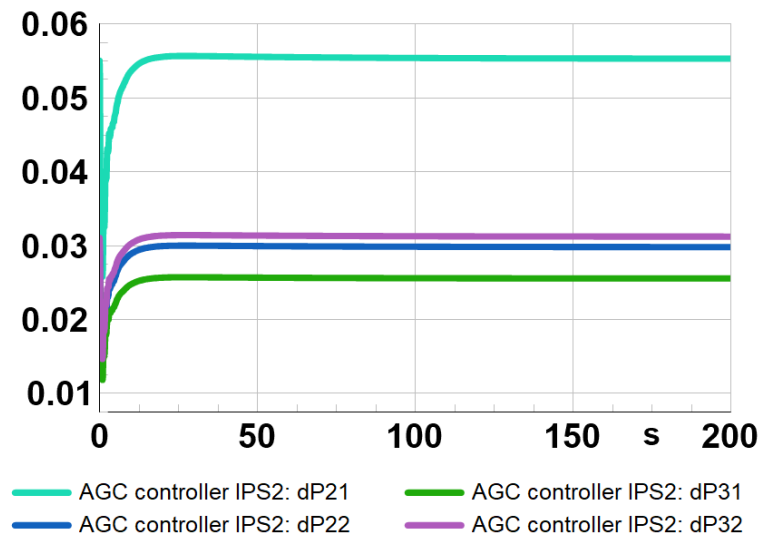
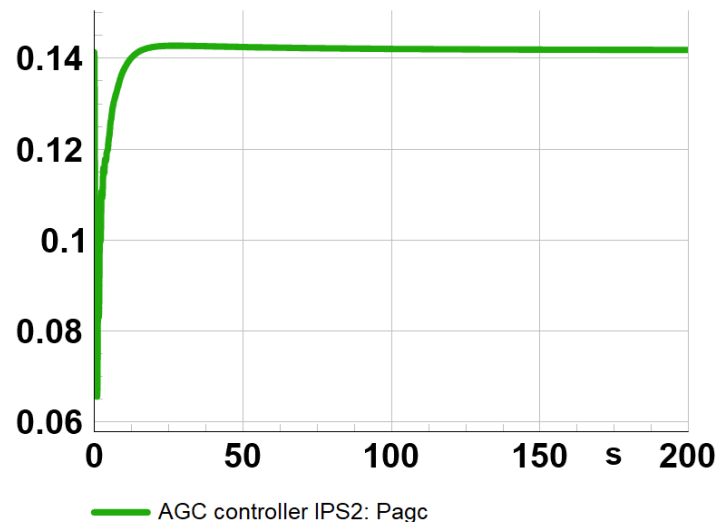
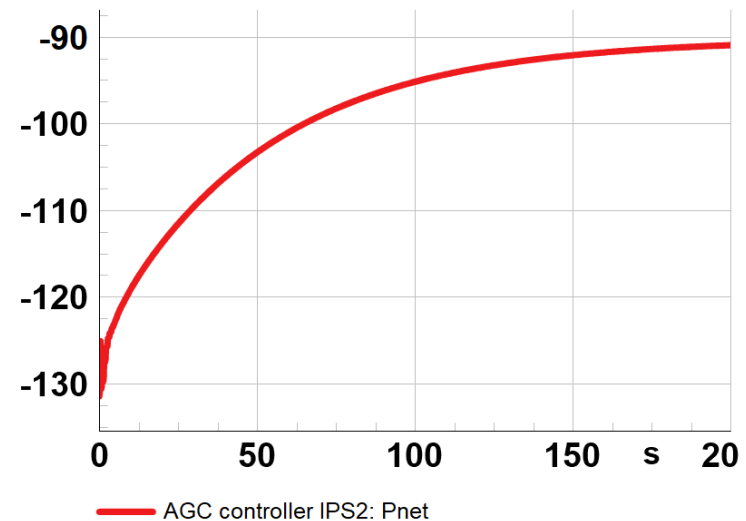
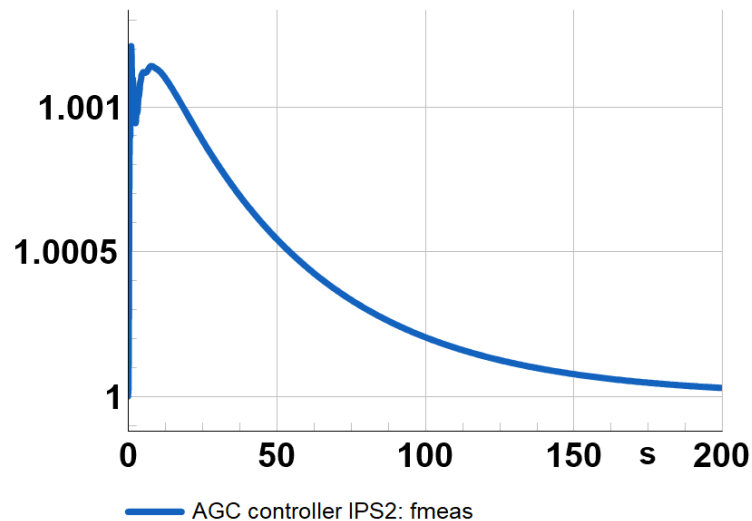
AGC IPS2 controller:



DSL Model - Network\AGC model IPS2\AGC controller IPS2.ElmDsl

Parameter	Value
fref Frequency set-point [p.u.]	1.
Gamma21 Share of Generator 21 in frequency control [p.u.]	0.39
Gamma22 Share of Generator 22 in frequency control [p.u.]	0.21
Gamma31 Share of Generator 31 in frequency control [p.u.]	0.18
Gamma32 Share of Generator 32 in frequency control [p.u.]	0.22
Kbias Frequency bias [p.u.]	-16.
Pbase Base power [MW]	1500.
Kp Proportional gain of PI controller [p.u.]	5.
Ki Integral gain of PI controller [s-1]	2.5
Pnetref Net interchange power set-point [MW]	-90.25
Page_min Minimum limitation of AGC signal [p.u.]	-10.
Page_max Maximum limitation of AGC signal [p.u.]	10.

Результати тестування моделі САРЧП



Метод ідентифікації «критичних» ПЛ



Вектор-стовпець впливових елементів визначає елементи мережі, відключення яких призводить до перевантаження інших елементів мережі.

$$M_{elem} = \begin{bmatrix} elem_1 \\ elem_2 \\ \dots \\ elem_i \\ \dots \\ elem_n \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n$$

Вектор-строка «слабких» ЛЕП M_{OHL} визначає ЛЕП, що перевантажуються, при відключенні відповідного впливового елементу мережі (елемент вектора-стовпця M_{elem}).

$$M_{OHL} = [OHL_1 \quad OHL_2 \quad \dots \quad OHL_j \quad \dots \quad OHL_m], \quad j = 1, \dots, m$$

Матриця завантаженості M_{ldg} зв'язує «слабкі» ЛЕП з «впливовими» елементами (небезпечними аварійними ситуаціями):

$$M_{ldg} = \begin{bmatrix} loading_{11} & loading_{12} & \dots & loading_{1j} & \dots & loading_{1m} \\ loading_{21} & loading_{22} & \dots & loading_{2j} & \dots & loading_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ loading_{i1} & loading_{i2} & \dots & loading_{ij} & \dots & loading_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ loading_{n1} & loading_{n2} & \dots & loading_{nj} & \dots & loading_{nm} \end{bmatrix}$$

Класифікація «критичних» ПЛ



Матриця $M_{aff.elem}$ характеризує «слабкі» елементи: визначає кількість перевантажень, а також максимальне значення перевантаження ЛЕП.

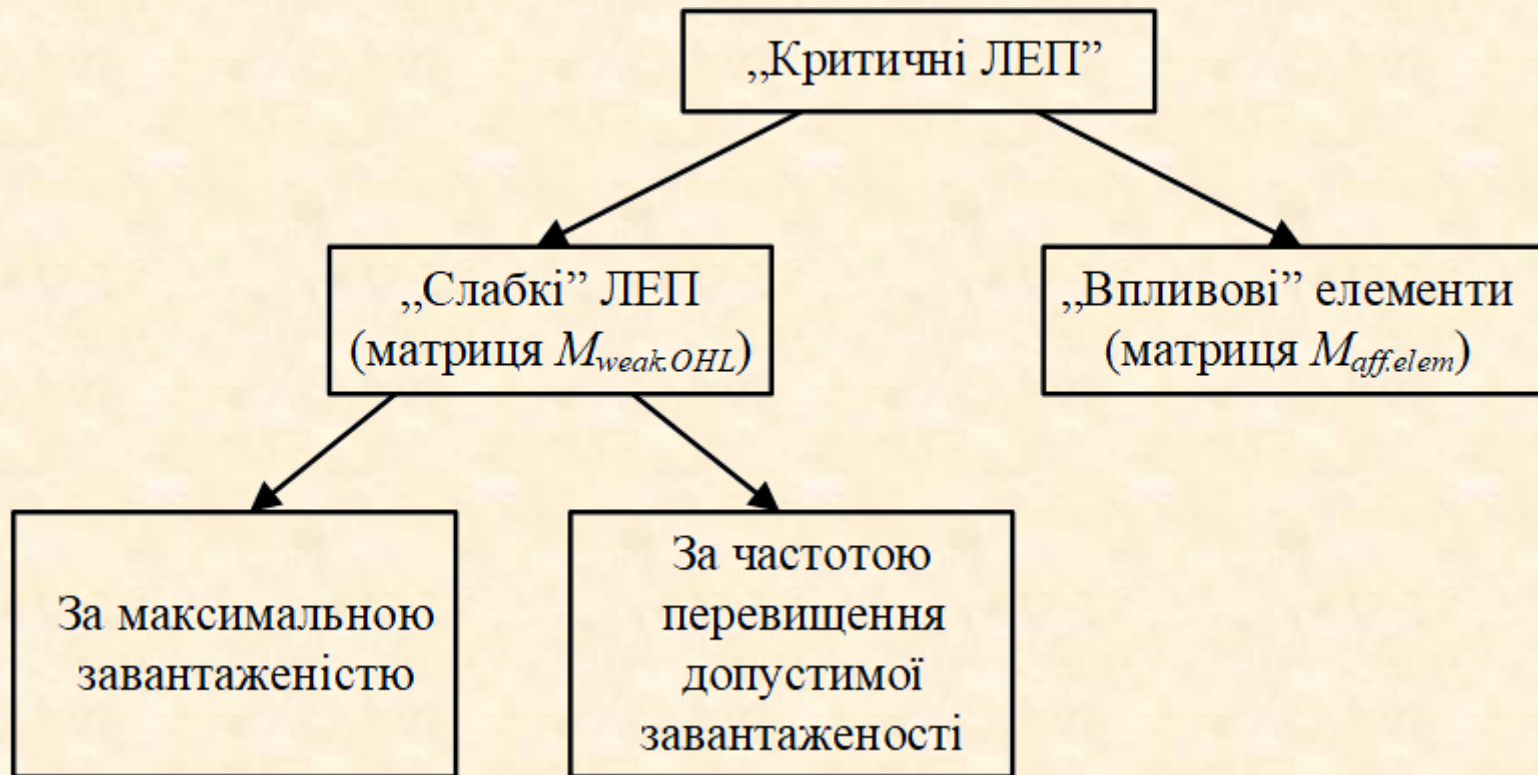
$$M_{aff.elem} = \begin{bmatrix} n_{max\ 1} & loading_{max\ 1} \\ n_{max\ 2} & loading_{max\ 2} \\ \dots & \dots \\ n_{max\ i} & loading_{max\ i} \\ \dots & \dots \\ n_{max\ n} & loading_{max\ n} \end{bmatrix}$$

де $n_{max\ i}$ - кількість перевищень завантаженості ЛЕП допустимого значення при виникненні i -небезпечної АС (тобто при вимкненні елементу $elem_i$ вектору елементів M_{elem}):

$$n_{max\ i} = \sum_{j=1}^m P_{ij}$$

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } loading_{ij} \geq loading_{доп} \\ 0, & \text{якщо } loading_{ij} < loading_{доп} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m$$

Класифікація «критичних» ПЛ



«Впливові» елементи – це елементи, відключення яких від мережі, призводить до перевищення допустимої навантаженості ПЛ.

«Слабкі» ПЛ можна класифікувати за:

- максимальною навантаженістю;
- кількістю перевищення допустимої навантаженості.

Блок-схема ідентифікації «критичних» ПЛ



Результат ідентифікації «критичних» ПЛ



Вектор-стовпець небезпечних елементів M_{elem} :

$$M_{elem} =$$

Л 1-2/1
Л 1-2/2
Л 6-12
Т-1

Вектор-рядок «критичних ЛЕП» M_{OHL}

$$M_{OHL} =$$

Л 1-2/1	Л 1-2/2	Л 6-13	Л 9-10	Л 1-5
---------	---------	--------	--------	-------

Матриця завантаженості M_{ldg} :

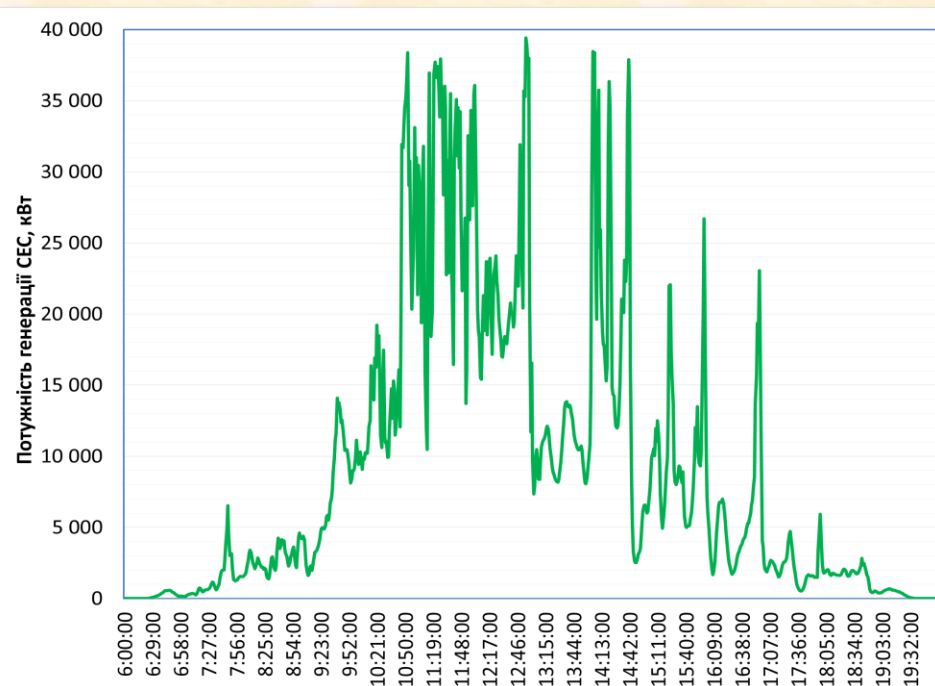
$$M_{ldg} =$$

	154,1			104,9
154,4				
		129,4		
			113,6	

Графіки генерації СЕС (хмарна погода)

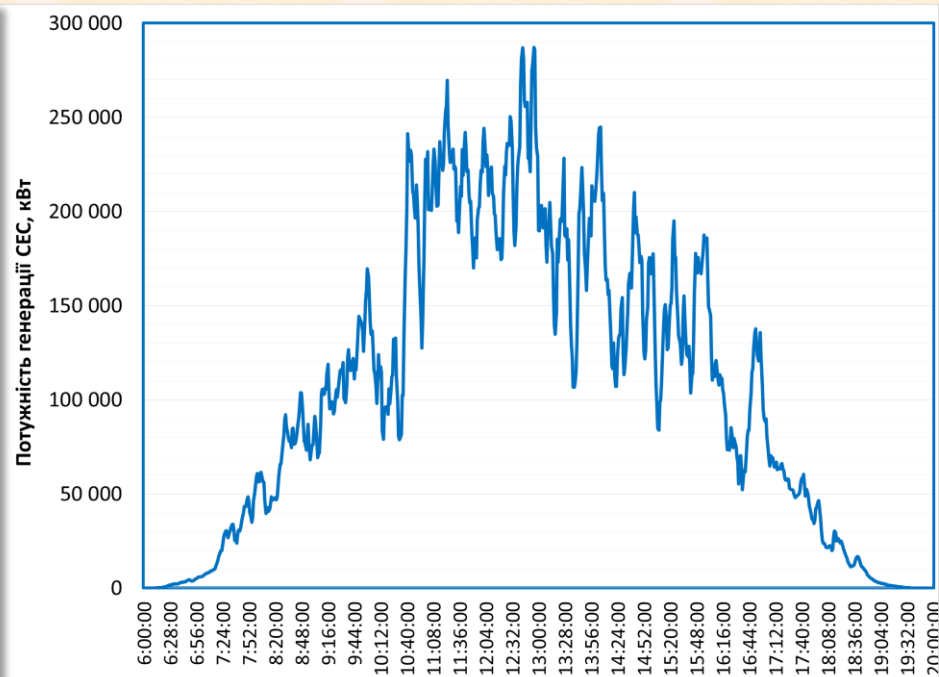


СЕС1



Зміна потужності СЕС – 89,6%, 8 хв

Сумарна потужність СЕС

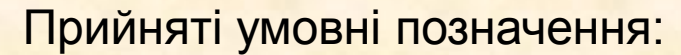


Зміна сумарної потужності
СЕС – 56,2%, 8 хв

Характеристики генерації СЕС



№ п/п	Сонячна станція	Найбільша зміна потужності $\Delta P_{\text{СЕС}}$, МВт	Час зміни ΔT , хв.	Швидкість зміни потужності $\Delta P_{\text{СЕС}}/\Delta t$, МВт/хв.	Максимальна потужність P_{max} , МВт	Зміна потужнос ті $\Delta P_{\text{СЕС}^*}$, %
1	СЕС1	73,8	10	7,38	98,17	75,2
2	СЕС2	35,3	8	4,42	39,41	89,6
3	СЕС3	31,66	11	2,88	39,19	80,8
4	СЕС4	35,28	14	2,52	40,86	86,3
5	СЕС5	17,36	6	2,89	23,63	73,5
6	СЕС6	55,36	10	5,54	77,37	71,5
7	СЕС7	6,65	6	1,11	7,73	86
8	СЕС8	17,11	4	4,28	29,63	57,7
9	Сумарна потужність	161,67	8	20,21	287,23	56,2



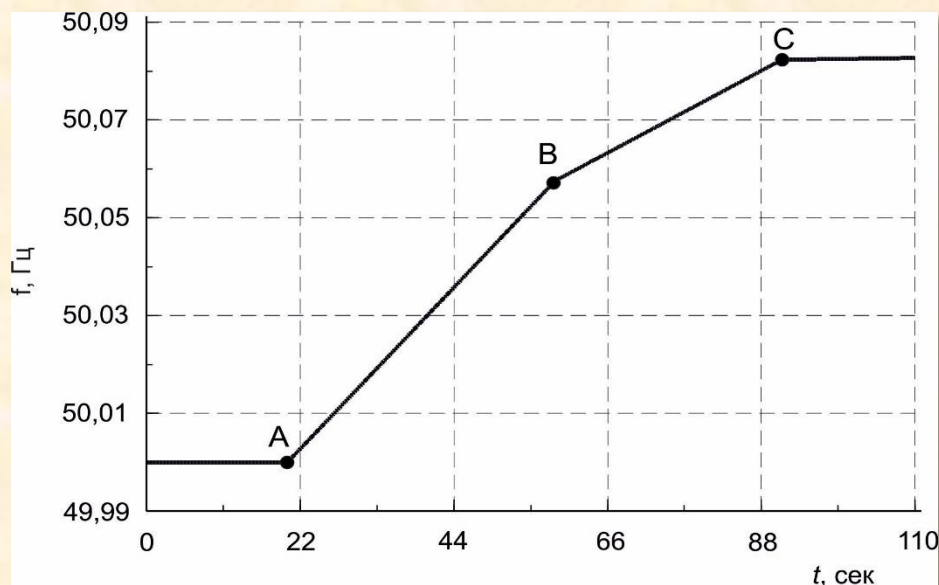
- БПР – блок попередніх розрахунків;
- ЛБ – логічний блок;
- ДЧ – давач частоти;
- ДН – давач напруги;
- ДС – давач струму.



Результати моделювання роботи СЕС



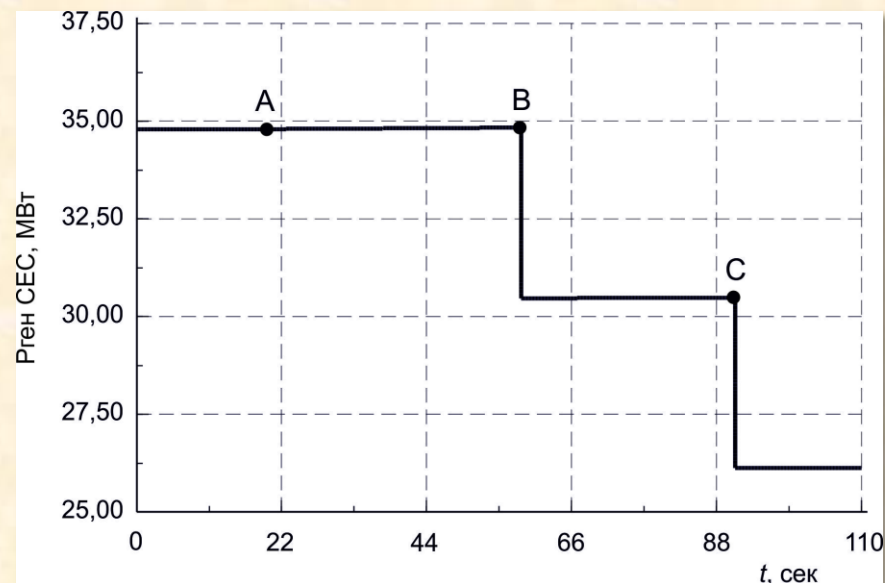
Частота в енергосистемі



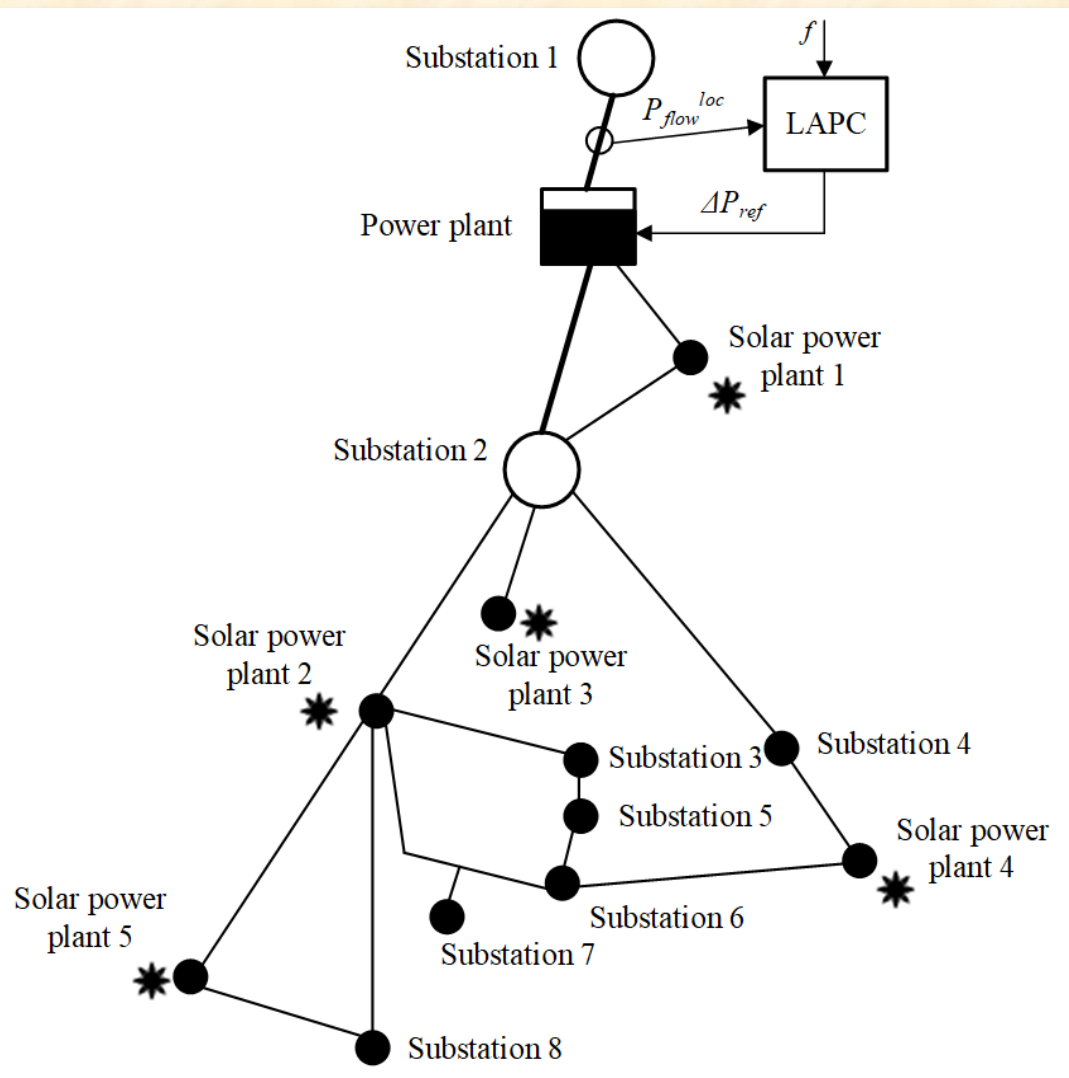
Оскільки частота продовжує збільшуватися, ПКЧ діє на відключення СЕ-2 (початкова точка - С). Таким чином, зменшення потужності генерації СЕС (вимкнення окремих фрагментів СЕС) дозволяє забезпечити зміну частоти в межах допустимих значень.

Нормальний режим енергосистеми (ЕС) – підтримуються задана потужність генерації СЕС та нормальна частота. Збільшення потужності генерації в ЕС – підвищення частоти в ЕС (початкова точка - А). При досягненні частотою першої уставки спрацювання ПКЧ (точка В), підсистема виробляє керуючу дію на відключення СЕ (початкова точка - В), що призводить до зменшення швидкості підвищення частоти (відрізок ВС).

Потужність генерації СЕС



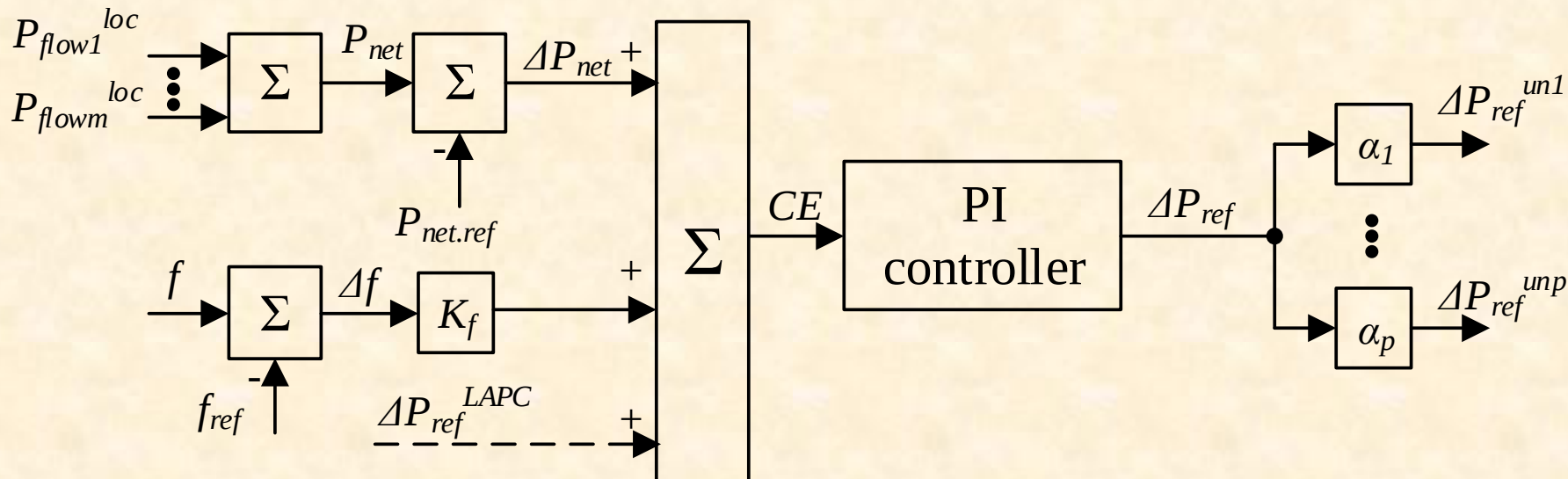
Локальний регулятор активної потужності



Небаланс активної потужності – зміна потужності генерації СЕС.

Задача локального регулятора активної потужності (LAPC – Local Active Power Controller) – **підтримання заданого перетікання потужності** між Підстанцією 1 та електростанцією за рахунок формування керуючої дії на зміну потужності генерації електростанції.

Локальний регулятор активної потужності



$$CE = (P_{net} - P_{net.ref}) + K_f(f - f_{ref}) + \Delta P_{ref}^{LAPC}$$

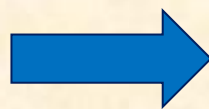
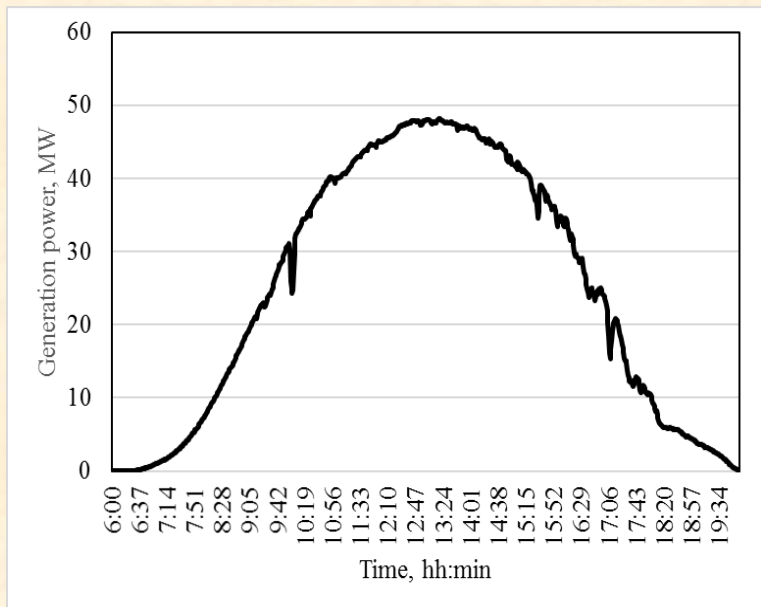
$$\Delta P_{ref} = K_p^{LC} CE + K_i^{LC} CE / p$$

Результати моделювання роботи ЛАРС

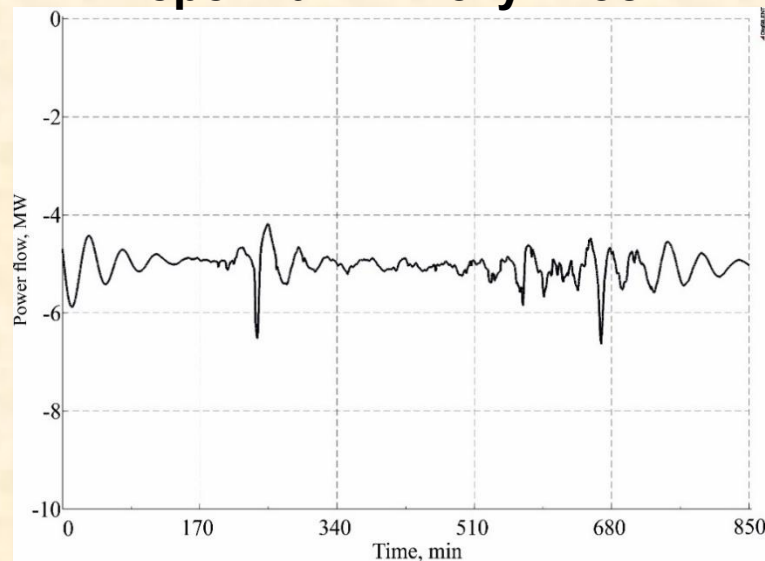


Потужність станції

Небаланс активної потужності

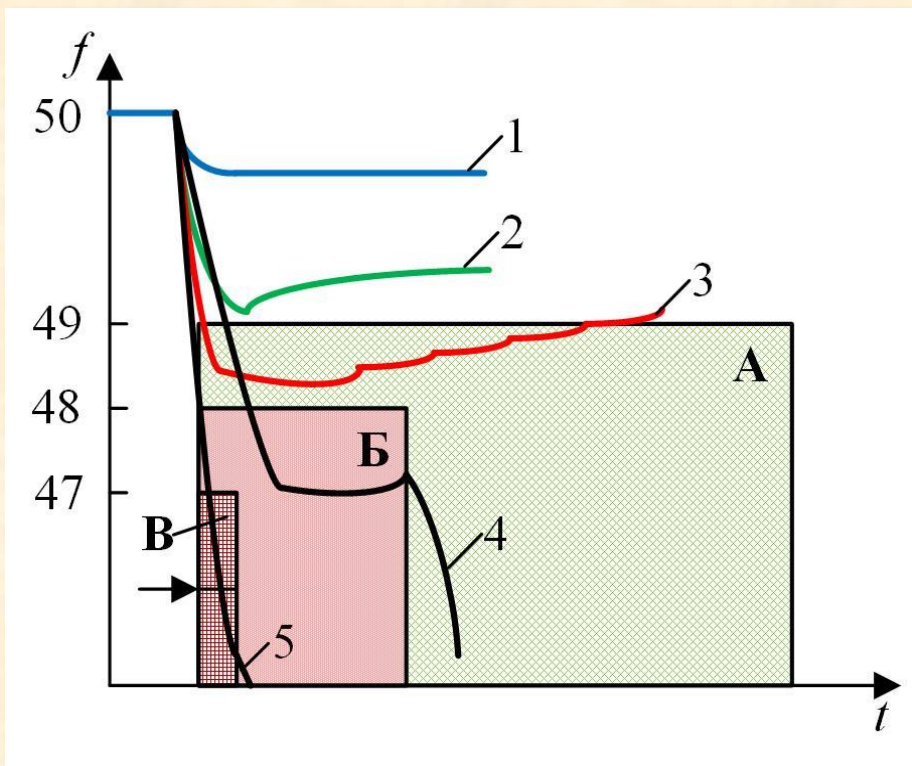


Перетікання потужності



В умовах змінної потужності генерації СЕС дія ЛРАП за рахунок зміни потужності регулювальної станції **дозволяє підтримувати задане перетікання потужності** контрольованою лінією електропередачі.

Допустима зміна частоти в ОЕС України при виникненні системної аварії



1 – допустиме відхилення частоти;

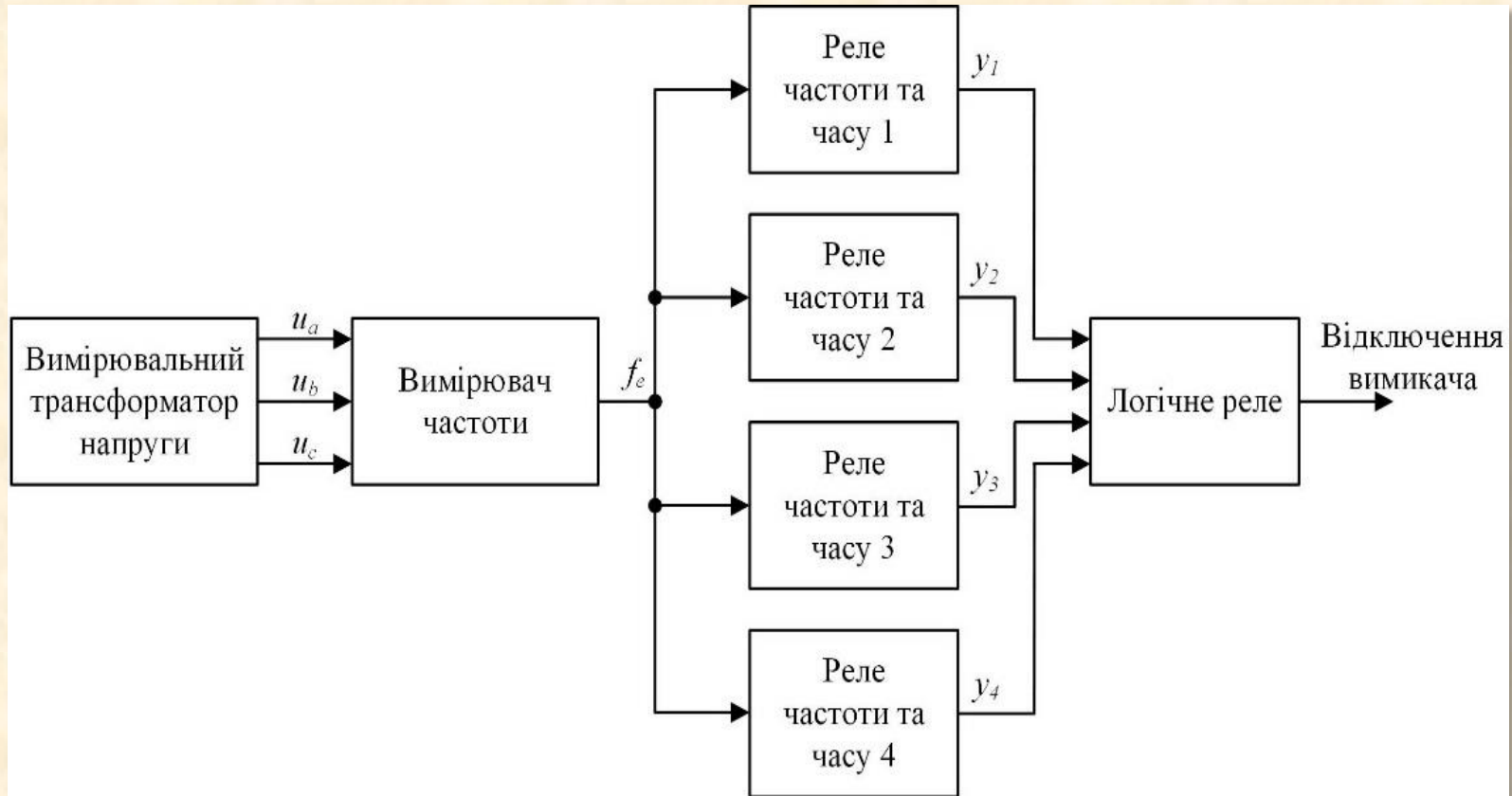
2 – значне відхилення частоти;

3 – глибоке зниження частоти з наступним її виходом за межі першої області спрацювання ЧА АЕС;

4 – порушення стійкості за частотою внаслідок спрацювання ЧА другої області;

5 – порушення стійкості за частотою внаслідок спрацювання ЧА третьої області.

Структурна схема моделі частотної автоматики енергоблоку АЕС





Реалізація моделі ЧА в ПЗ

DSL Model Type - User Defined Models\UA\Model CHA\Freq SPA relay.BlkDef

Основные опции

Уравнения

Описание

Версия

Дополнительные уравнения

```
inc(signal_8)=0
```

```
inc(signal_9)=0
```

```
!The over-frequency trigger area
```

```
inc(signal_1h)=0
```

```
inc(signal_2h)=0
```

```
inc(signal_3h)=0
```

```
!Trigger condition of frequency automatics in the first under-frequency area
```

```
signal1 = flipflop(signal_1*signal_2*
```

```
signal_1 = select(50*fmeas<f1_uf,1,0)
```

```
signal_2 = select(50*delay(fmeas,t1_u
```

```
signal_3 = select(50*fmeas>f2_uf,1,0)
```

```
!Trigger condition of frequency automatics in the second under-frequency area
```

```
signal2 = flipflop(signal_4*signal_5*
```

```
signal_4 = select(50*fmeas<f2_uf,1,0)
```

```
signal_5 = select(50*delay(fmeas,t2_u
```

```
signal_6 = select(50*fmeas>f3_uf,1,0)
```

```
!Trigger condition of frequency automatics in the third under-frequency area
```

```
signal3 = flipflop(signal_7*signal_8*
```

```
signal_7 = select(50*fmeas<f3_uf,1,0)
```

```
signal_8 = select(50*delay(fmeas,t3_u
```

Имя

Ы

Тип

▼

→

...dels\UA\Model CHA\Freq SPA relay

Скрипт конфигурации

→

☐ Выведено из работы

☐ А-устойчивый алгоритм

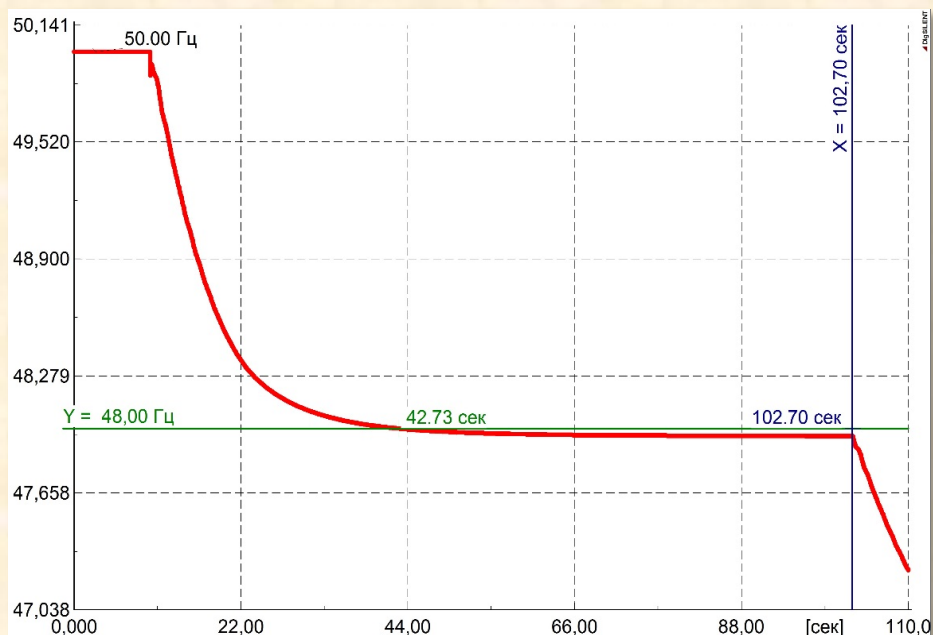
Параметр

► f1_uf Уставка по частоте срабатывания в первой обл...	49.
f2_uf Уставка по частоте срабатывания во второй обл...	48.
f3_uf Уставка по частоте срабатывания в третьей обл...	47.
f_lim Граничное значение частоты [Гц]	46.
f_of Уставка срабатывания по частоте при ее повыш...	99.
t1_uf Уставка по времени срабатывания в первой обл...	300.
t2_uf Уставка по времени срабатывания во второй о...	60.
t3_uf Уставка по времени срабатывания в третьей обл...	10.
t_of Уставка срабатывания по времени при повыше...	10.

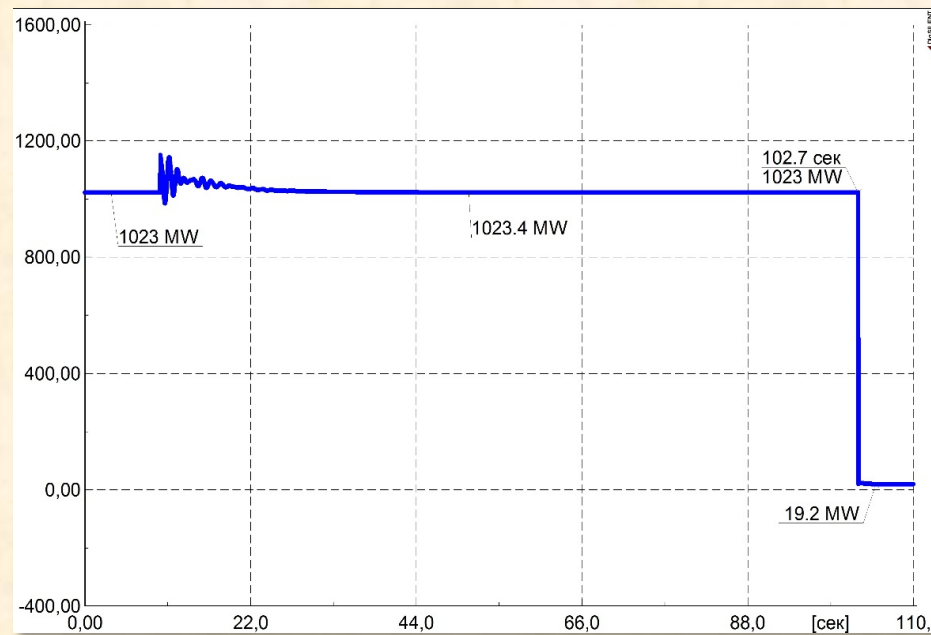
Результати тестування моделі ЧА в ПЗ



Зміна частоти в ОЕС України



Зміна потужності генерації енергоблоку АЕС



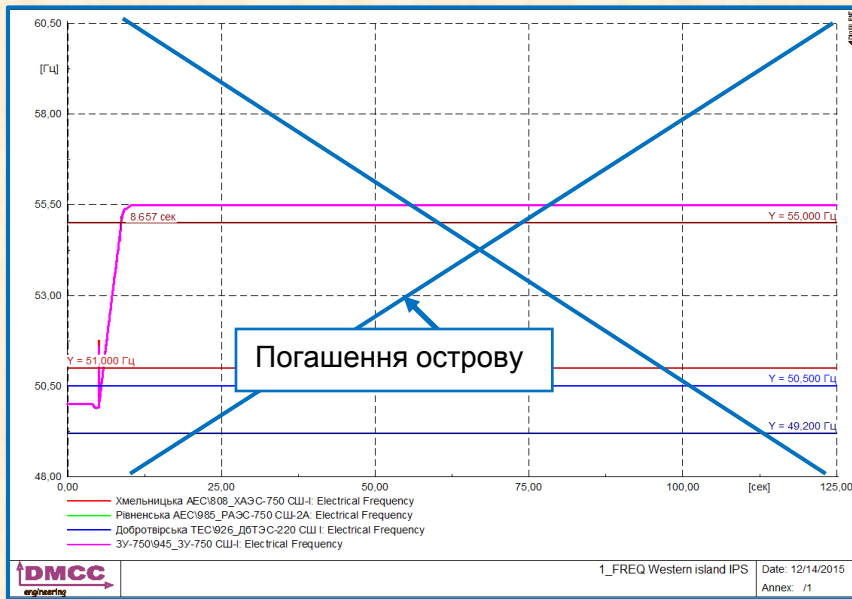


Аварія – поділ ОЕС України на два острови

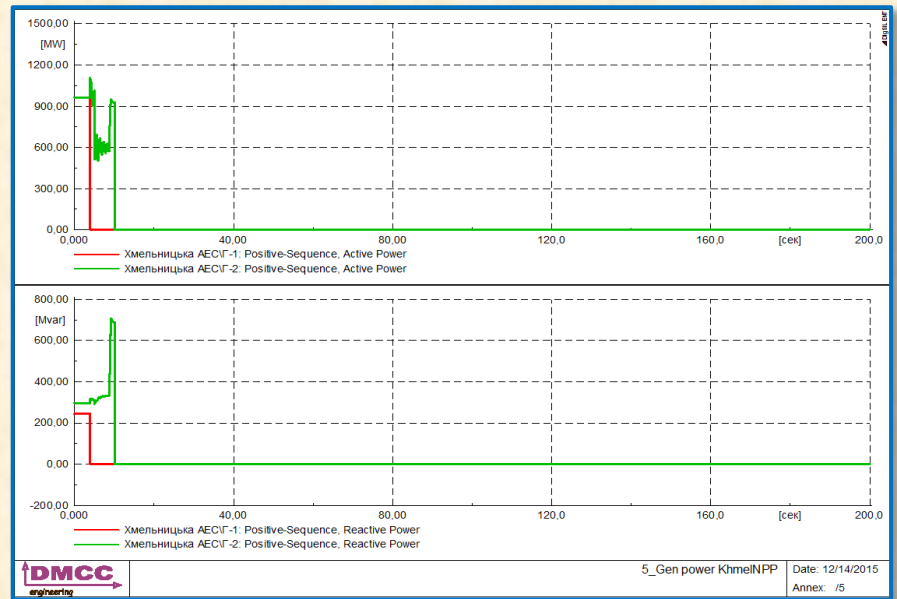


Результати моделювання для «західного острова»

Зміна частоти у західному «острові»



Зміна потужності генерації Хмельницької АЕС

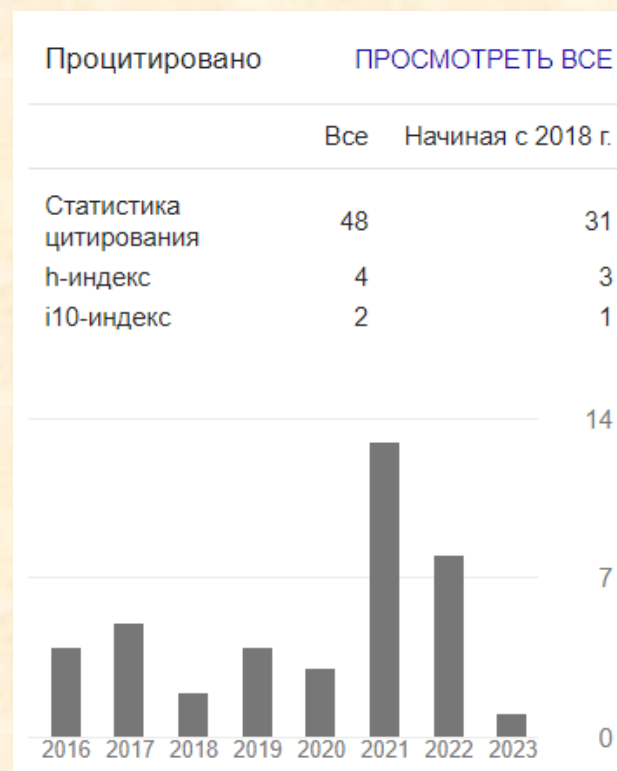
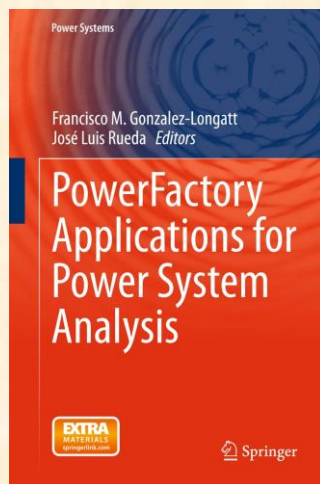
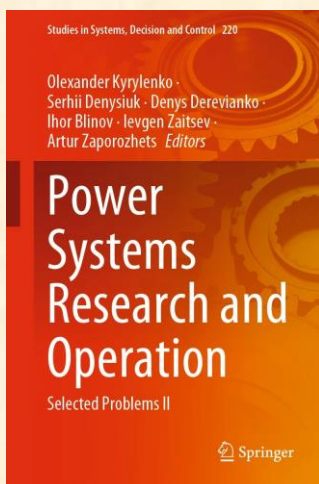


Кількість публікацій за темою доповіді



Загальна кількість публікацій за темою доповіді – **46**, з них:

- міжнародних журналах, що індексуються Scopus – **16**;
- розділи монографії, що входять до Scopus – **4**;
- фахових періодичних виданнях – **22**;
- розділи монографії – **3**;
- авторські свідоцтва – **2**.





- Проведено аналіз зміни частоти в ОЕС України за умов її ізолюваної, а також синхронної роботи з енергооб'єднаннями ОЕС/ЄЕС та ENTSO-E. Встановлено, що незважаючи на збільшення діапазону зміни частоти в ізолюваному режимі та за умов синхронної роботи вітчизняної ОЕС з ENTSO-E, порівняно з паралельною роботою з ОЕС/ЄЕС зміна частоти задовольняє вимогам щодо якості регулювання частоти та активної потужності, що використовуються в ENTSO-E.
- Розроблено модель системи автоматичного регулювання частоти та потужності ОЕС України, яка охоплює системний, станційний та агрегатний рівні керування. Розроблена модель, на відміну від існуючих, враховує режими роботи магістральних мереж та міждержавних перетинів ОЕС України, що дозволяє підвищити надійність синхронної роботи ОЕС України з енергосистемами сусідніх країн. Налаштування параметрів моделі САРЧП виконано з використанням результатів ідентифікації частотних параметрів ОЕС України на основі натурних випробувань.



- Розроблено метод ідентифікації «критичних ліній електропередачі», який базується на використанні «принципу надійності N-1». Запропоновано класифікацію «критичних ЛЕП»: за максимальною завантаженістю та за частотою перевищення допустимої завантаженості. Використання запропонованого методу в режимі on-line дозволить автоматизувати моделювання аварійних режимів роботи енергосистем та здійснювати аналіз «критичних ЛЕП» в ОЕС України.
- Запропоновано структуру підсистеми керування режимом роботи електростанцій з ВДЕ в умовах зміни частоти в енергосистемі. Зазначена система може бути виконана як окрема підсистема АСУ ТП підстанцій, що дозволяє підвищити надійність ведення режимів енергосистем.
- Розроблено модель частотних автоматик енергоблоків АЕС та досліджено стійкість ОЕС України за частотою за умов виникнення системних аварій, які супроводжуються значною зміною частоти. Отримані результати дослідження режимів за частотою дозволили визначити режими роботи ОЕС України за умови попередження відключення енергоблоків АЕС від мережі.

Дякую за увагу!