

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем

Магістерська кваліфікаційна робота
на тему: "Оптимальне керування потоками потужності в
електричних мережах електроенергетичних систем"

Виконав: студент групи ЕСМ-14м
Дресвянкін В. С

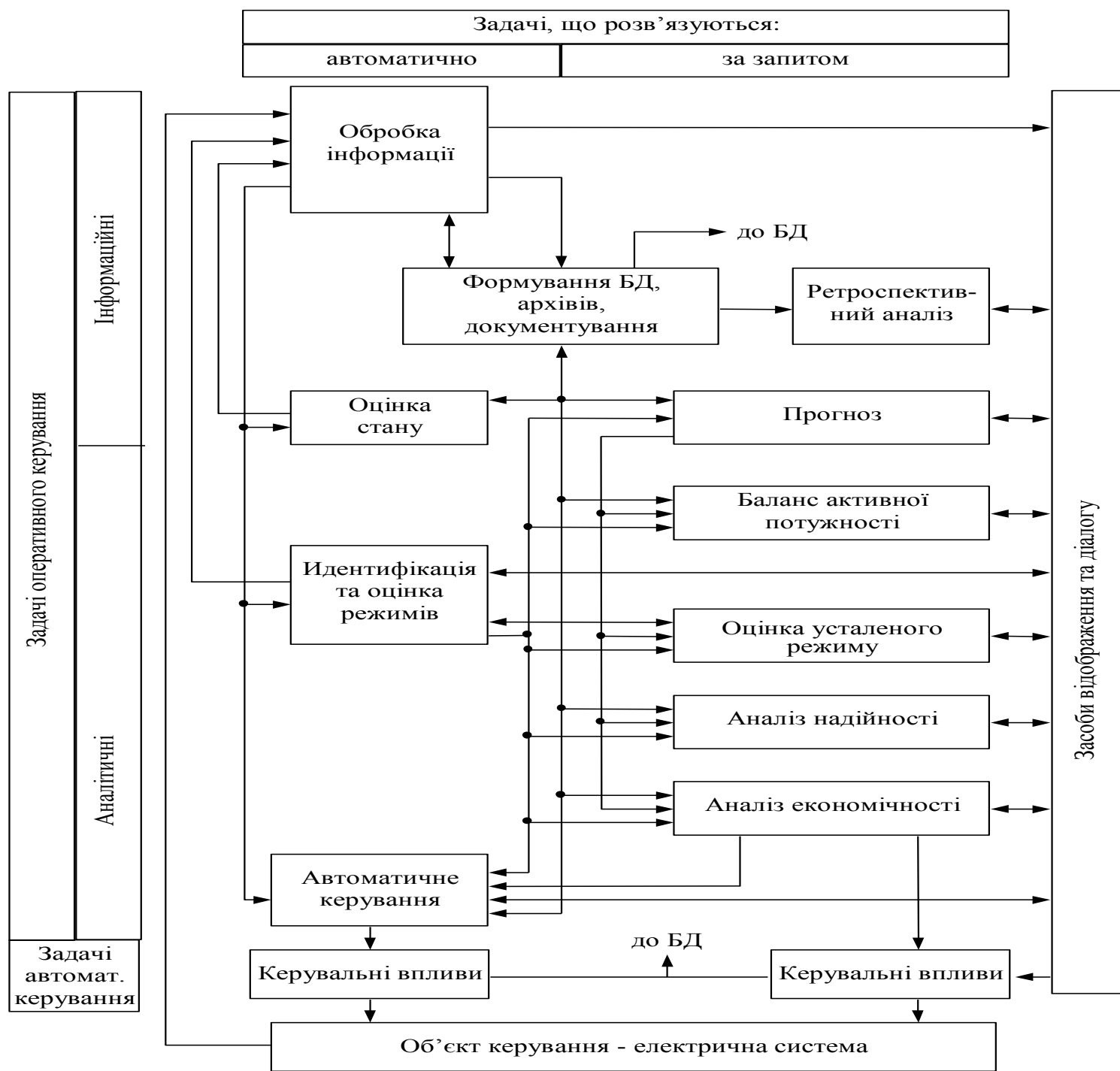
Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС
Кулик В.В

Метою роботи є підвищення ефективності оптимального керування нормальними режимами електричних систем за критерієм мінімуму втрат електроенергії шляхом вдосконалення на основі моделювання неоднорідності ЕС методів та засобів компенсації її негативного впливу.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **основні задачі**:

- дослідження математичної моделі неоднорідності ЕС;
- вдосконалення методу оптимального керування нормальними режимами ЕС
- розроблення алгоритму формування законів оптимального керування нормальними режимами ЕС для компенсації впливу неоднорідності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що вдосконалено метод формування законів оптимального керування потоками потужності в електроенергетичних системах шляхом урахування впливу статичних характеристик навантаження та температурних залежностей опору ЛЕП, що дозволило підвищити адекватність формування керувальних впливів для регулювальних пристроїв силових трансформаторів.



Задача визначення струмів, які забезпечують мінімум втрат активної потужності в ЕС може бути сформульована таким чином:

$$\Delta P = \dot{\mathbf{I}}_t \mathbf{r} \hat{\mathbf{I}} \quad (1)$$

за умови :

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}' \mathbf{I}_a &= \mathbf{J}_a \\ \mathbf{M}' \mathbf{I}_p &= \mathbf{J}_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Функція Лагранжа для (1) з урахуванням рівнянь зв'язку (2)

$$W = \Delta P + [\boldsymbol{\mu}_{at} \boldsymbol{\mu}_{pt}] \begin{bmatrix} \mathbf{M}' \mathbf{I}_a - \mathbf{J}_a \\ \mathbf{M}' \mathbf{I}_p - \mathbf{J}_p \end{bmatrix},$$

Побудуємо практичний алгоритм визначення оптимальних струмів у вітках і генеруючих вузлах:

$$\mathbf{I}_{p0} = \mathbf{C}'_r \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p \\ \bar{\mathbf{J}}_p \\ \mathbf{J}_p \end{bmatrix} = \mathbf{r}^{-1} [\mathbf{M}'_t \mathbf{M}''_t \mathbf{M}''_t] \mathbf{r}'_{ij} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p \\ \bar{\mathbf{J}}_p \\ \mathbf{J}_p \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_p \\ \boldsymbol{\mu}_r \end{bmatrix} = -2\mathbf{r}'_{ij} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p \\ \bar{\mathbf{J}}_p \\ \mathbf{J}_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_{p0} = -\frac{1}{2} \mathbf{r}^{-1} [\mathbf{M}'_t \mathbf{M}''_t \mathbf{M}''_t] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_p \\ \boldsymbol{\mu}_r \end{bmatrix}$$

Вектор оптимальних коефіцієнтів трансформації:

$$\dot{k}_{i,j} = 1 - \dot{\pi}_*^E J, \quad i = \overline{1, q} \quad (1)$$

$$k' = 1 - \pi_a^E J_{*p}, \quad k'' = -\pi_p^E J_{*a} \quad (2)$$

де k' , k'' – вектори дійсних та уявних складових коефіцієнтів трансформації.

Останній вираз коефіцієнтів трансформації для системи автоматичного керування є законом оптимального керування нормальними режимами ЕС. З урахуванням фактору часу вони записуються в такому чині :

$$k_*'(t) = 1 - \pi_a^E J_{*p}(t), \quad k_*''(t) = -\pi_p^E J_{*a}(t) \quad - \text{у відносних одиницях}$$

Кінцеві розрахункові формули законів оптимального керування трансформаторами з РПН з урахуванням приведення параметрів ЕС до напруги базисного вузла мають вигляд:

$$\begin{aligned} k'(t) &= 1 - \left[E_{zpa}^{(6)} \right]_{\text{д}} \cdot U_{\text{бд}}^{-1} \cdot \pi_a^E \cdot J_{*p}(t), \\ k''(t) &= - \left[E_{zpp}^{(6)} \right]_{\text{д}} \cdot U_{\text{бд}}^{-1} \cdot \pi_p^E \cdot J_{*a}(t), \end{aligned} \quad - \text{у іменованих одиницях}$$

де $U_{\text{бд}}$ – діагональна матриця, кожний елемент якої дорівнює напрузі базисного вузла.

Врахування температурних залежностей активних опорів струмоведучих частин електричних мереж

Активний опір віток ЛЕП r_B

$$r_B = r_{20} + r_t \quad (1)$$

Додатковий опір провідника, що зумовлений впливом температури навколишнього середовища та струмового навантаження визначається:

$$r_t = r_{20} \alpha_{np} \left(t_{o.c}^0 + \frac{1 + \alpha_{np} (t_{o.c}^0 - 20)}{\frac{2c\sqrt{\pi F}}{I^2 r_{20}} - \alpha_{np}} \right) = r_{20} k_t$$

$$\dot{E}_{зп} = -j \left(\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \dot{N}_{Ak} \mathbf{X}_B (\mathbf{R}_{B20} + \mathbf{R}_{Bt})^{-1} \dot{M}'_6^T - \\ - \dot{N}_{Ak} \mathbf{X}_B (\mathbf{R}_{B20} + \mathbf{R}_{Bt})^{-1} \dot{M}'_{Ak} \mathbf{Y}_R^{-1} \mathbf{Y}'_{R6} \end{array} \right] \dot{U}_6 + \\ + \dot{N}_{Ak} \mathbf{X}_B (\mathbf{R}_{B20} + \mathbf{R}_{Bt})^{-1} \dot{M}'_{Ak} \mathbf{Y}_R^{-1} \dot{\mathbf{j}} \end{array} \right)$$

Виконуємо поділ на складові та виконуємо перетворення:

$$\dot{E}_{зп} = \dot{E}_{зп20} - \Delta \dot{E}_{зпт}$$

$$\dot{E}_{зп20} = -j \left(\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \dot{N}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_{B20}^{-1} \dot{M}'_6^T - \\ - \dot{N}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_{B20}^{-1} \dot{M}'_{Ak} \mathbf{Y}_R^{-1} \mathbf{Y}'_{R6} \end{array} \right] \dot{U}_6 + \\ + \dot{N}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_{B20}^{-1} \dot{M}'_{Ak} \mathbf{Y}_R^{-1} \dot{\mathbf{j}} \end{array} \right) \quad \dot{E}_{зпт} = j \left(\begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} \dot{N}_{Ak} \mathbf{R}_{\Delta^*} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_{B20}^{-1} \dot{M}'_6^T - \\ - \dot{N}_{Ak} \mathbf{R}_{\Delta^*} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_{B20}^{-1} \dot{M}'_{Ak} \mathbf{Y}_R^{-1} \mathbf{Y}'_{R6} \end{array} \right] \dot{U}_6 + \\ + \dot{N}_{Ak} \mathbf{R}_{\Delta^*} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_{B20}^{-1} \dot{M}'_{Ak} \mathbf{Y}_R^{-1} \dot{\mathbf{j}} \end{array} \right)$$

$$r_{\Delta i, i} = \frac{r_{ii}}{(r_{20i, i} + r_{ii})} = \frac{k_{ti}}{1 + k_{ti}}$$

$$k \neq f(t) \quad k_{ij} = 1 - (E_{зп20} - E_{зпт})$$

Статичні характеристики навантаження можна подати так:

$$P(U) = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{N_P} ; Q(U) = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{N_Q}$$

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_\Delta)$$

$$j_{0,i} = \frac{P_{0,i} - jQ_{0,i}}{\sqrt{3}\hat{U}} \quad \text{— задаючий струм } i\text{-го вузла, розрахований за поточними потужностями навантаження (генерування);}$$

$$j_{\Delta,i} = \frac{P_{\Delta,i} - jQ_{\Delta,i}}{\sqrt{3}\hat{U}} \quad \text{— поправка до задаючого струму } i\text{-го вузла, за рахунок статичної характеристики навантаження}$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{зр} = -j \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_6'^T - \\ \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}'^T \mathbf{Y}_R'^{-1} \mathbf{Y}_{R6}' \end{array} \right] \dot{\mathbf{U}}_6 + \\ + \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}'^T \mathbf{Y}_R'^{-1} (\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_\Delta) \end{array} \right)$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{нз}^{opt} = -j(\dot{\mathbf{E}}_{*γ} \dot{\mathbf{U}}_6 + \dot{\mathbf{Z}}_\phi \mathbf{J}_0) - j \dot{\mathbf{Z}}_\phi \mathbf{J}_\Delta = \dot{\mathbf{E}}_{нз0}^{opt} + \dot{\mathbf{E}}_{нз\Delta}^{opt}$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{нз}^{opt} = j(\dot{\mathbf{E}}_{*γ} \dot{\mathbf{U}}_6 + \dot{\mathbf{Z}}_\phi \mathbf{J}_0)$$

$$\mathbf{k}_a = -\dot{\mathbf{E}}_{нз*}'' - (\pi_{a1}^J \mathbf{J}_{*a,0} + \pi_{a2}^J \mathbf{J}_{*p,0}) - (\pi_{a1}^J \mathbf{J}_{*a,\Delta} + \pi_{a2}^J \mathbf{J}_{*p,\Delta}) = \mathbf{k}_{a,0} + \mathbf{k}_{a,\Delta};$$

$$\mathbf{k}_p = j\dot{\mathbf{E}}_{нз*}' - j(\pi_{p1}^J \mathbf{J}_{*a,0} + \pi_{p2}^J \mathbf{J}_{*p,0}) - j(\pi_{p1}^J \mathbf{J}_{*a,\Delta} + \pi_{p2}^J \mathbf{J}_{*p,\Delta}) = \mathbf{k}_{p,0} + \mathbf{k}_{p,\Delta}.$$

**Порівняльна таблиця результатів
застосування методів оптимізації поточкорозподілу в
ЕС для прикладу ЕС 110–220 кВ**

Параметр	Режим		
	1	2	3
Втрати потужності у початковому стані ΔP , МВт	9.22	8.95	14.24
Метод оптимізації поточкорозподілу в ЕС з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів у явному вигляді			
Втрати потужності у оптимізованому стані ΔP_o , МВт	8.68	8.53	13.18
Зниження втрат потужності $d\Delta P$, $\frac{\text{МВт}}{\%}$	<u>0.54</u> 5.9%	<u>0.42</u> 4.7%	<u>1.06</u> 7.4%
Сумарна кількість перемикачів РПН	4	4	8
Середня ефективність одного перемикачів РПН, МВт/перемикач.	0.11	0.10	0.13
Метод оптимізації поточкорозподілу в ЕС з приведенням параметрів ЕС до базисної напруги			
Втрати потужності у оптимізованому стані ΔP_o , МВт	8.72	8.61	13.48
Зниження втрат потужності $d\Delta P$,	<u>0.5</u> 5.4%	<u>0.34</u> 3.8%	<u>0.76</u> 5.3%
Сумарна кількість перемикачів РПН	3	3	8
Середня ефективність одного перемикачів РПН, МВт/перемикач.	0.16	0.11	0.09
Економічні втрати потужності ΔP_e, МВт	7.84	7.51	10.62

**Порівняльна таблиця результатів застосування
методів оптимізації поточкорозподілу в ЕС для прикладу
ЕС 110–750 кВ ПЗЕС**

8

Параметр	Режим		
	1	2	3
Втрати потужності у початковому стані ΔP , МВт	94.10	81.69	201.29
Метод оптимізації поточкорозподілу в ЕС з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів у явному вигляді			
Втрати потужності у оптимізованому стані ΔP_o , МВт	89.98	78.15	189.05
Зниження втрат потужності $d\Delta P$, $\frac{\text{МВт}}{\%}$	<u>4.12</u> 4.4%	<u>3.54</u> 4.3%	<u>12.24</u> 6.1%
Сумарна кількість перемикачів РПН	6	8	14
Середня ефективність одного перемикачів РПН, МВт/перемикач.	0.69	0.44	0.87
Метод оптимізації поточкорозподілу в ЕС з приведенням параметрів ЕС до базисної напруги			
Втрати потужності у оптимізованому стані ΔP_o , МВт	90.18	78.98	192.24
Зниження втрат потужності $d\Delta P$,	<u>3.92</u> 4.2%	<u>2.71</u> 3.3%	<u>8.76</u> 4.4%
Сумарна кількість перемикачів РПН	6	6	12
Середня ефективність одного перемикачів РПН, МВт/перемикач.	0.65	0.45	0.73
Економічні втрати потужності ΔP_e, МВт	65.32	62.47	145.75

Зміна вартості втрат електроенергії:

$$\Delta E_{\Delta W} = p_H \cdot d\Delta P \cdot \tau$$

	Зменшення вартості втрат електроенергії, тис. грн.		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Метод приведення пасивних параметрів до базисної напруги для ЕС 110–220 кВ	1855	1261	2819
Економіна ефективність одного перемикання тис. грн./пер.	1,7	1,1	0,9

	Зменшення вартості втрат електроенергії, тис. грн.		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Метод оптимізації поточкорозподілу в ЕС з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів у явному вигляді для ЕС 110–220 кВ.	2003	1558	3932
Економіна ефективність одного перемикання тис. грн./пер.	1.4	1.1	1.3

	Зменшення вартості втрат електроенергії, тис. грн.		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Метод оптимізації поточкорозподілу в ЕС з приведенням параметрів ЕС до базисної напруги для ЕС 110–750 кВ	14543	10054	32499
Економіна ефективність одного перемикання тис. грн./пер.	6.7	4.6	7.4

	Зменшення вартості втрат електроенергії, тис. грн.		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Метод оптимізації поточкорозподілу в ЕС з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів у явному вигляді для ЕС 110–750 кВ	15285	13133	45410
Економіна ефективність одного перемикання тис. грн./пер.	6.9	4.5	8.9

У роботі наведене нове вирішення актуальної задачі підвищення ефективності транспортування та розподілу електроенергії електричними мережами ЕС, що виявляється у вдосконаленні методу оптимального керування нормальними режимами ЕС з урахуванням термічної нестабільності опорів ЛЕП та статичних характеристик навантаження.

1. Проаналізовано математичні моделі неоднорідної ЕС у яких коефіцієнти трансформації трансформаторів та автотрансформаторів зв'язку враховані у явному вигляді, що дає можливість враховувати вплив зрівнювальних струмів від незбалансованих коефіцієнтів трансформації на оптимальність поточкорозподілу в ЕС. Вказані моделі можуть бути використані для удосконалення засобів автоматизації оптимального керування нормальними режимами ЕС.

2. Вдосконалено метод формування законів оптимального керування коефіцієнтами трансформації, що забезпечує підвищення адекватності функціонування систем автоматичного керування і, таким чином, дозволяє більш ефективно використовувати наявні регульовальні пристрої з метою зменшення втрат активної потужності в електричних системах.

3. Розроблено алгоритм визначення критеріїв подібності, що базується на характерних властивостях розроблених моделей нормальних режимів неоднорідних ЕС. Це дозволило підвищити ефективність процесу формування та адаптації законів оптимального керування потоками потужності в ЕС.

4. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів, була перевірена шляхом проведення розрахунків з керування поточкорозподілом реальних електроенергетичних систем.

5. Розглянуто економічний вплив на ЕС двох методів керування перетоками потужності в електричних мережах і вибрано кращий з них. Кращим виявився метод оптимізації поточкорозподілу в ЕС з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів у явному вигляді

6. Визначено небезпечні фактори, які впливають на оперативно-ремонтний персонал, який обслуговує обладнання підстанцій, а також технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії, а саме допустимі параметри мікроклімату, склад повітря робочої зони, виробниче освітлення, шум і вібрацію. Проведена оцінка стійкості роботи електричних мереж в умовах впливу іонізуючих випромінювань і в умовах дії електромагнітного імпульсу. Розроблено заходи по підвищенню стійкості роботи електричних мереж в умовах надзвичайних ситуацій

**ДОПОВІДЬ ЗАКІНЧЕНО.
ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**