



ВПЛИВ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

д.т.н., професор Лежнюк Петро Дем'янович
д.т.н., професор Комар Вячеслов Олександрович
аспіранти Луців П.Д. , Семенюк Ю.В.

ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ЯК ЕЛЕМЕНТ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

2

Мета – оптимальне інтегрування ВДЕ в електричні мережі. Критерій оптимальності – створення сприятливих умов для розбудови ВДЕ з одночасним покращанням техніко-економічних показників електричних мереж

Потенційні можливості та особливості ВДЕ в електричних мережах

- Вплив на режимну та балансову надійність (БН). ВЕС і ФЕС як елементи забезпечення БН характеризуються нестабільністю генерування. Тому в ЕЕС обов'язковим має бути резервування. Це може бути резерв від ТЕС ЕЕС та індивідуальні або групові накопичувачі електроенергії.
- Зменшення втрат електроенергії шляхом оптимізації потужності і місць під'єднання ВДЕ. Оптимізація перетоків потужності зміною конфігурації мережі, сумісним використанням різнотипних ВДЕ (наприклад, ФЕС і малих ГЕС).
- Покращення якості електроенергії регулюванням напруги і реактивної потужності ВДЕ (ФЕС, ВЕС, малих ГЕС).

- Спрацювання технічного ресурсу;
- Середня тривалість перерв в електропостачанні (SAIDI) для України 600 (300) хв/рік;
- Середня кількість перерв в електропостачанні (SAIFI) для України 5-6 в рік;
- Технологічні втрати електроенергії в 2020 р. становили 17,0 млрд. кВтг або 11,82% від відпуску електроенергії в мережу (в 2021 р. за 6 місяців ТВЕ склали 12,9 млрд. кВтг або 11,1%). В розподільних мережах втрати майже 14% від відпущеної. Вироблено ВДЕ 1,9 млрд. кВтг це – 1,7% від загального балансу.
- Якість електричної енергії

Участь ВДЕ в балансуванні режимів

В системі для надійного та якісного електропостачання споживачів має підтримуватися баланс потужності:

$$P_{\text{цжк}}(t) + \sum_{i=1}^n P_i(t) - \sum_{j=1}^m P_{\text{ТП}j}(t) - \Delta P(t) \pm \sum P_{\text{нак}}(t) = 0,$$

де $P_{\text{цжк}}(t)$ – потужність, яка передається в систему від централізованих джерел електроенергії; $\sum_{i=1}^n P_i(t)$ – потужність ВДЕ; $P_{\text{ТП}i}(t)$ – навантаження трансформаторних підстанцій (ТП), m – кількість ТП; $\Delta P(t)$ – ТВЕ в електричних мережах; $\sum P_{\text{нак}}(t)$ – потужність накопичувачів електроенергії або потужність резервної потужності (складає 20–30% від потужності ВДЕ).

Оптимальна потужність резерву:

$$B_{\Sigma} = B(P_P) + B(P_{\text{ПС}}) + B(\Delta W) \rightarrow \min,$$

де $B(P_P) = v_{P_P}^{\text{гит}} \cdot P_P$ – витрати на резерв генеруючої потужності P_P ; $B(P_{\text{ПС}}) = v_{P_{\text{ПС}}}^{\text{гит}} \cdot P_{\text{ПС}}$ – витрати на запаси пропускної спроможності ліній електропередач (ПСЛЕП); $v_{P_P}^{\text{гит}}$, $v_{P_{\text{ПС}}}^{\text{гит}}$ – питомі витрати (грн/кВт) на створення резерву генерування і витрати на підтримання запасу по ПСЛЕП відповідно; $B(\Delta W) = v_0 \cdot M[\Delta W]$ – витрати на компенсацію споживачам за недовідпущену електроенергію; v_0 – питома вартість кВт-год недовідпущеної електроенергії (грн/кВт-год), $M[\Delta W]$ – математичне очікування недовідпуску електроенергії, яке зумовлене нестабільністю генерування ВДЕ.

$f=50 \text{ Гц}$ $f \neq \uparrow \downarrow 50 \text{ Гц}$

Потужність
накопичувачів
електроенергії

Потужність
накопичувачів
електроенергії

Потужність
централізованих
джерел
електроенергії

Технологічні втрати в
електричних
мережах

Навантаження
трансформаторних
підстанцій

а)

Потужність
ВДЕ

Потужність
накопичувачів
електроенергії

Потужність
централізованих
джерел
електроенергії

Потужність
накопичувачів
електроенергії

Технологічні втрати
в електричних
мережах

Навантаження
трансформаторних
підстанцій

б)

Результати комутації ФЕС в електричних мережах

6

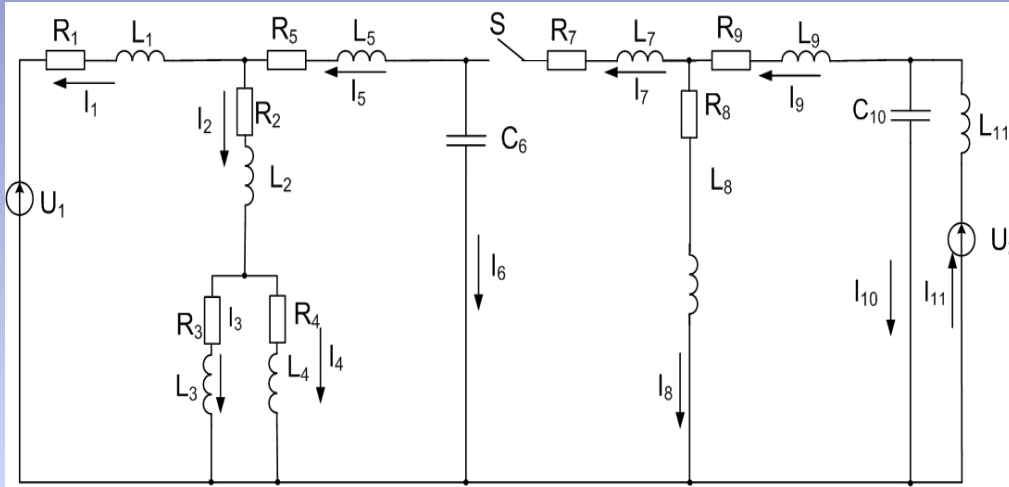


Рис. 1 - Заступна схема мережі з ФЕС

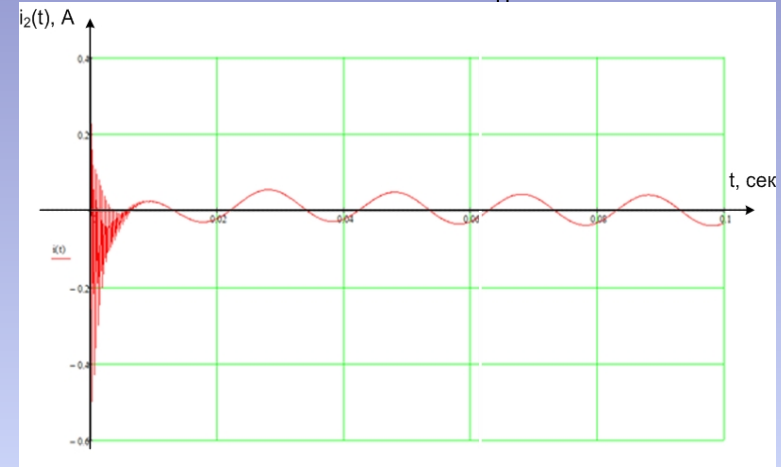


Рис. 2 - Залежність струму в первинній обмотці трансформатора напруги під час увімкнення ФЕС в мережі

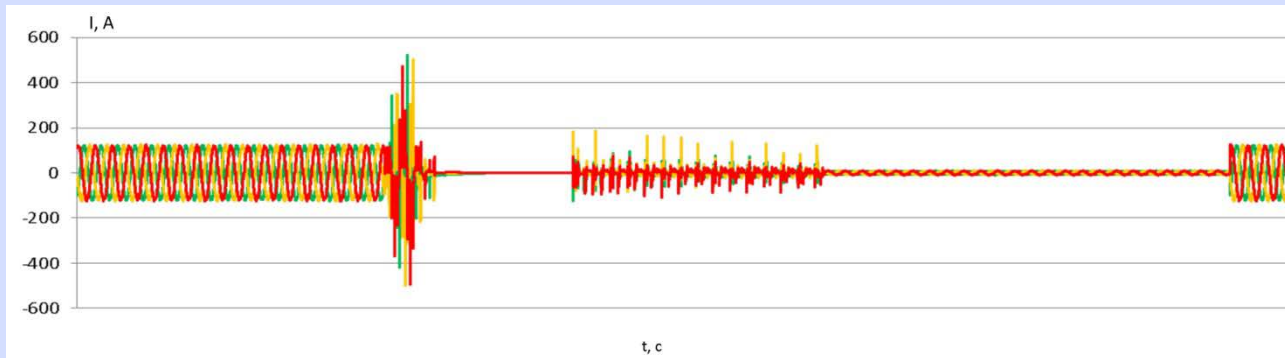


Рис. 3 – Зміна струму під час виконання комутації (результати вимірювання)

Пошкодження обладнання електричних мереж

7

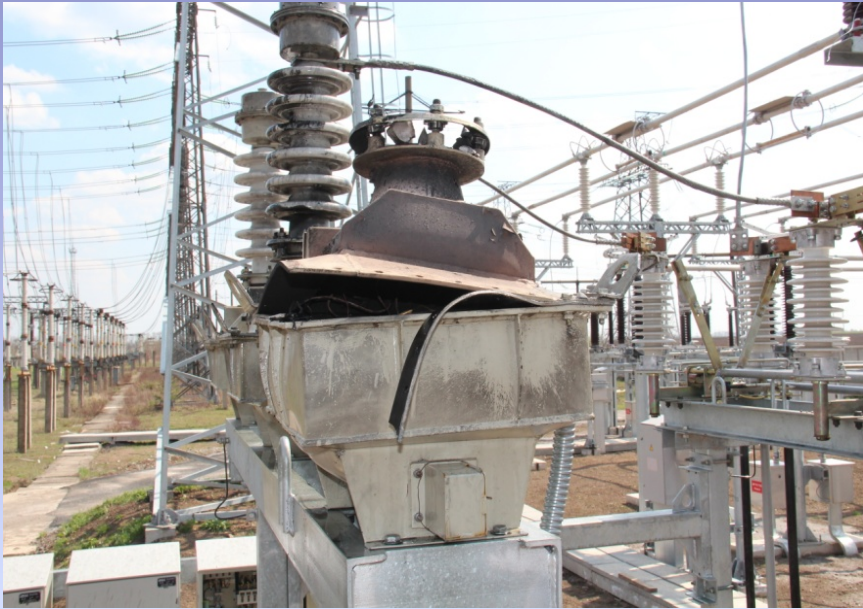


Замикання жили кабелю на броню і вигорання



Пошкодження обладнання електричних мереж

8



Вплив ВДЕ на надійність роботи електричних мереж

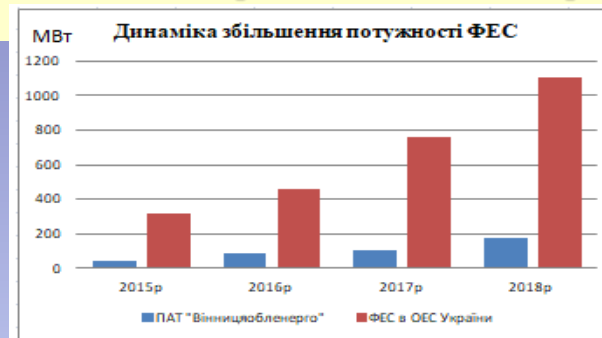
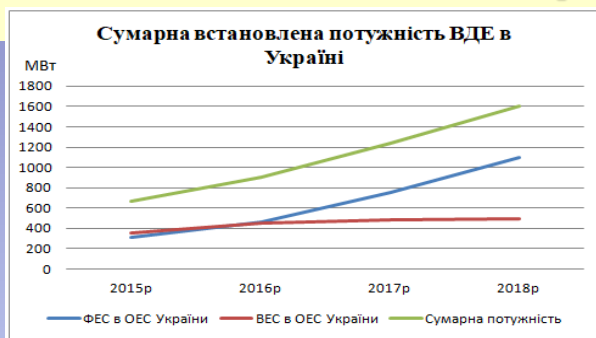


Рисунок 1 – Зміна потужності ВДЕ в ОЕС України та по АТ «Вінницяобленерго»

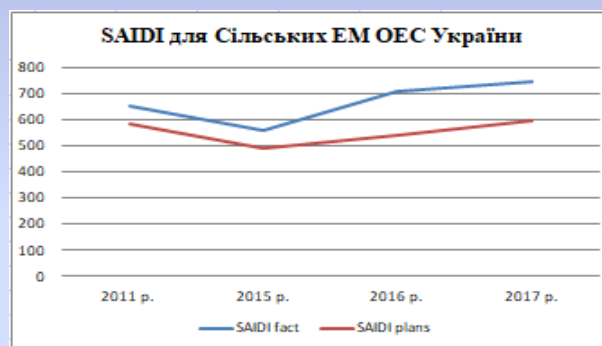
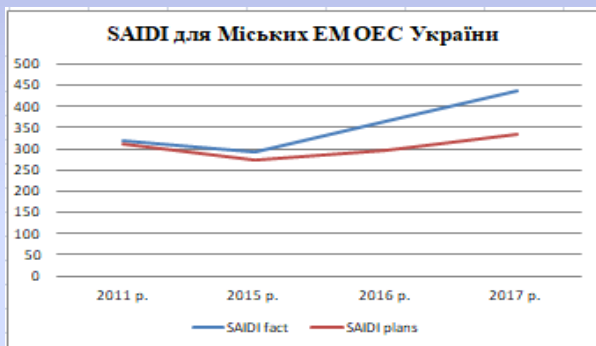


Рисунок 2 – Зміна цільового показника SAIDI (червона крива) та фактичного (синя крива) для а) міських та) сільських мереж ОЕС України

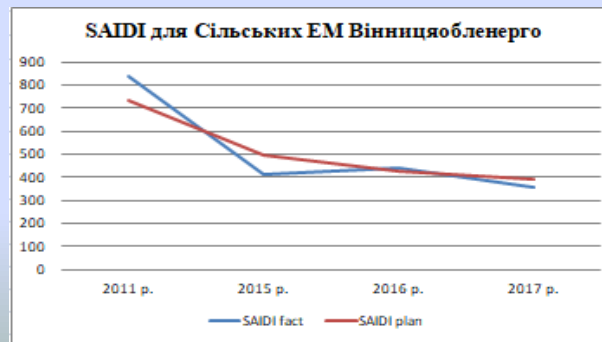
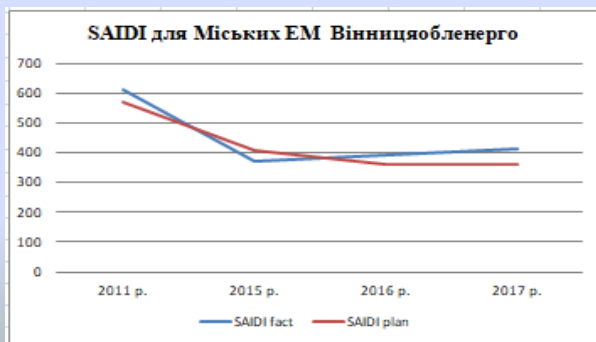
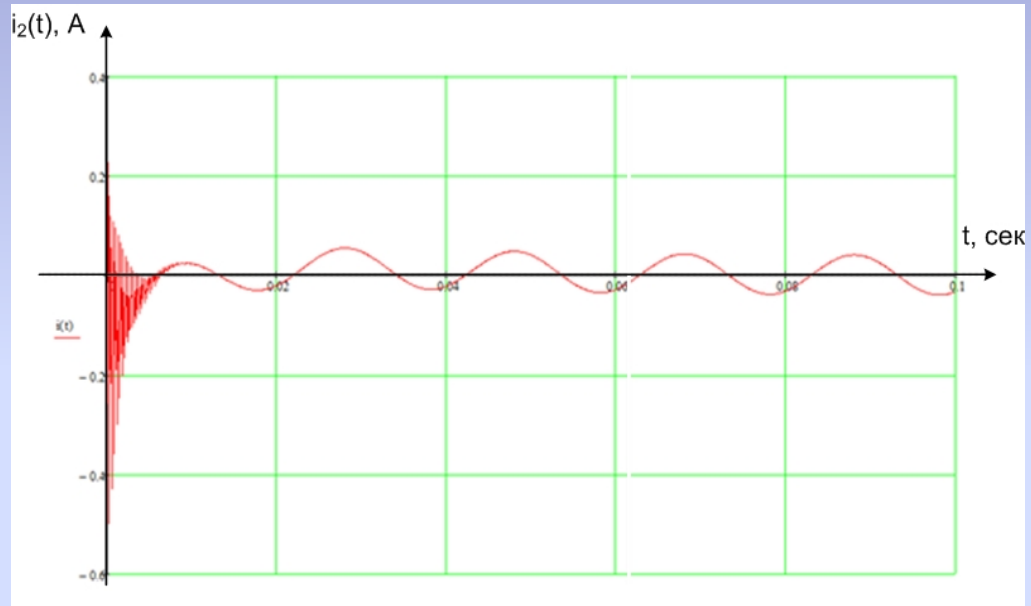
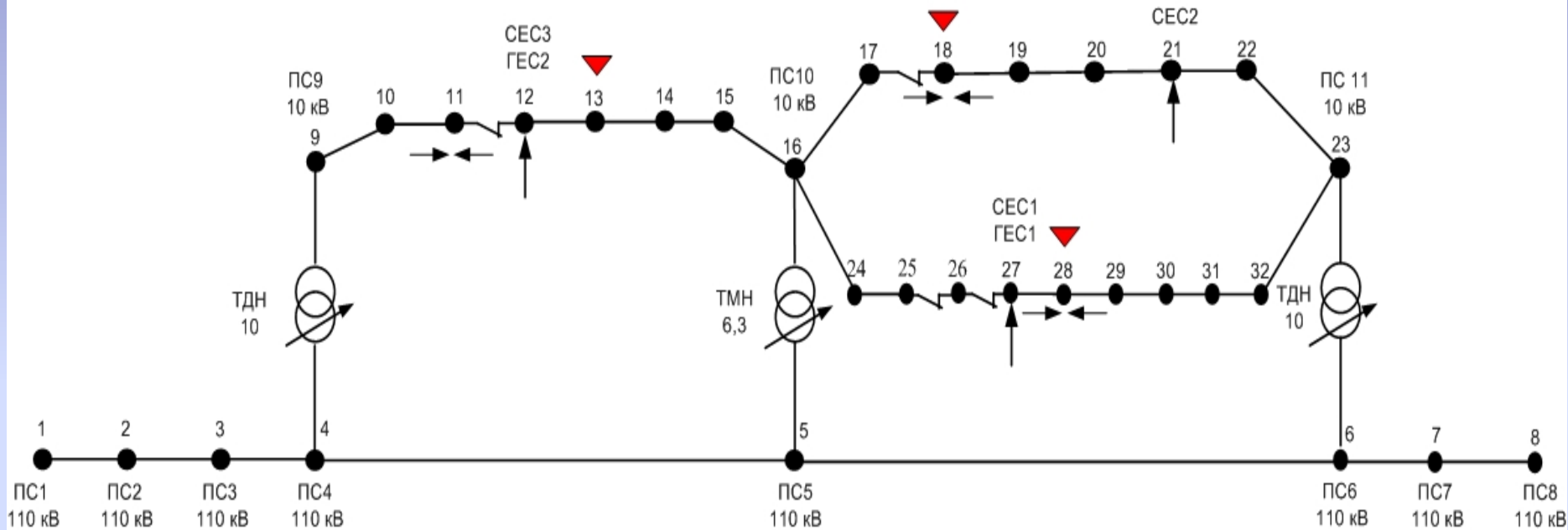


Рисунок 3 – Зміна цільового показника SAIDI (червона крива) та фактичного (синя крива) для а) міських, б) сільських електромереж АТ «Вінницяобленерго»

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ В PS CAD



Результати визначення точок поточкорозділу за початкових умов



Початкові умови:

Джерела живлення: СЕС 1 – **0,6 МВт**, СЕС 2 – **1,5 МВт**, СЕС 3 – **1МВт**, ГЕС 1 – 0 МВт, ГЕС 2 – 0 МВт, ПС1 та ПС8.

Всі кола схеми замкнені.

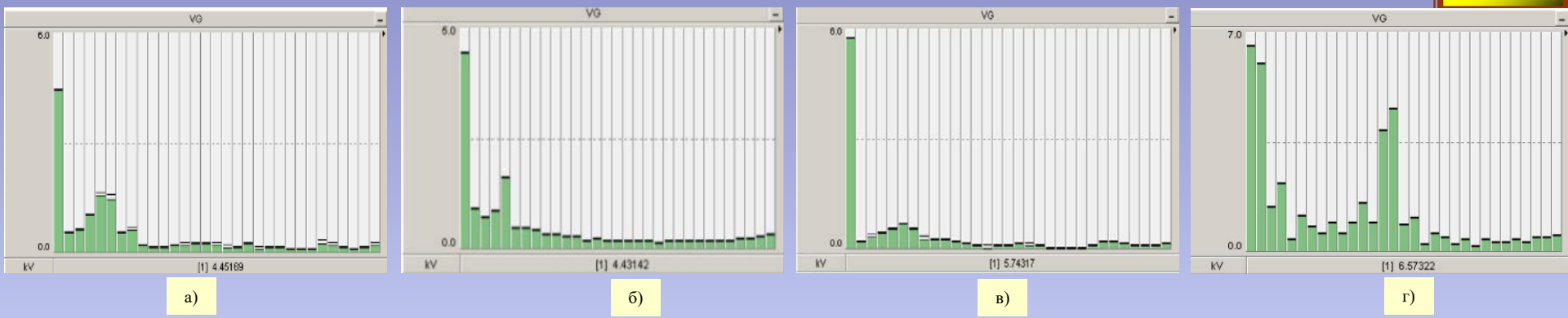
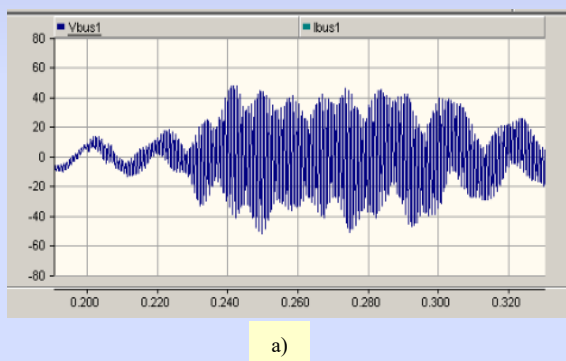


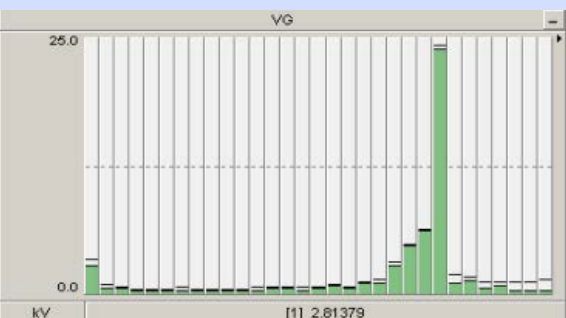
Рис. 1 – Гармонійні складові в напрузі на шинах СЕС за умови використання на СЕС:

а) PI контролера, в якому застосовується перетворення в dq систему координат; б) PR контролера, в якому застосовується перетворення в $\alpha\beta$ систему координат; в) PI контролера, в якому застосовується перетворення в abc систему координат; г) використання DV контролера, в якому застосовується перетворення в abc систему координат.

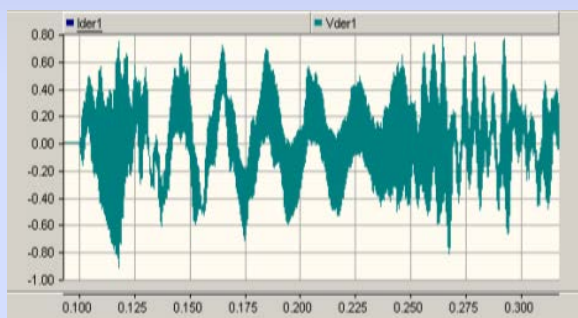


а)

Рис. 2 – Почергове увімкнення СЕС1 і СЕС2 та потужного споживача: а) спотворення синусоїди напруги на шинах ПС 10 кВ; б) спектр гармонійних складових напруги на ПС 10 кВ

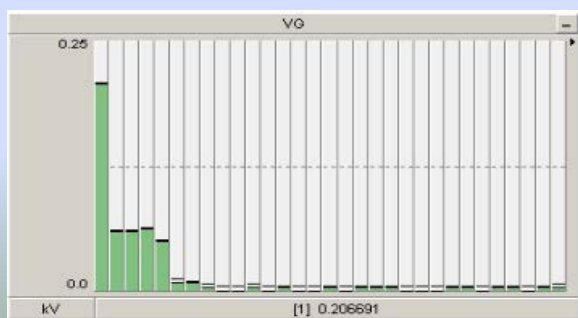


б)



а)

Рис. 3 – Одночасне ввімкнення СЕС1 і СЕС2 та потужного споживача (при успішному АПВ): а) спотворення синусоїди напруги на шинах СЕС1 0,4 кВ; б) спектр гармонійних складових напруги на СЕС1 0,4 кВ.



б)

Моделі розподільних електричних мереж з пошкодженням високовольтним обладнанням

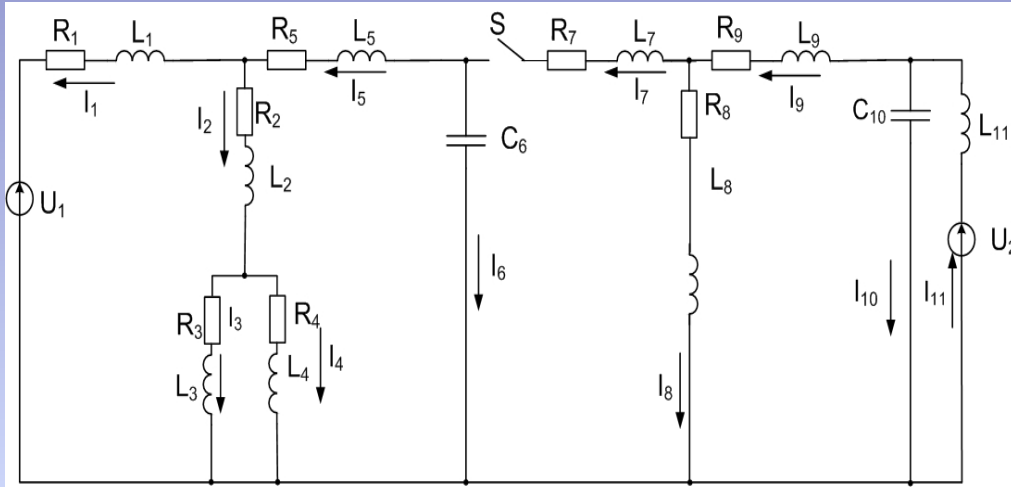


Рис. 1 Заступна схема мережі з СЕС

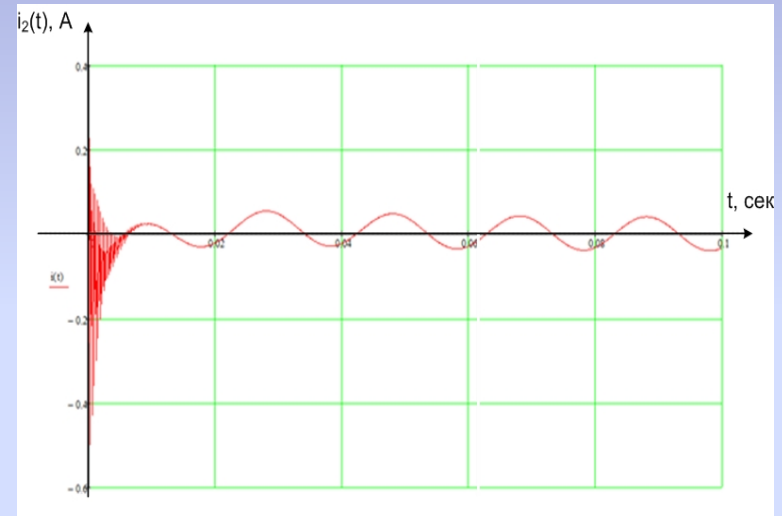


Рис. 3 Залежність струму в первинній обмотці трансформатора напруги від часу під час увімкнення СЕС до мережі

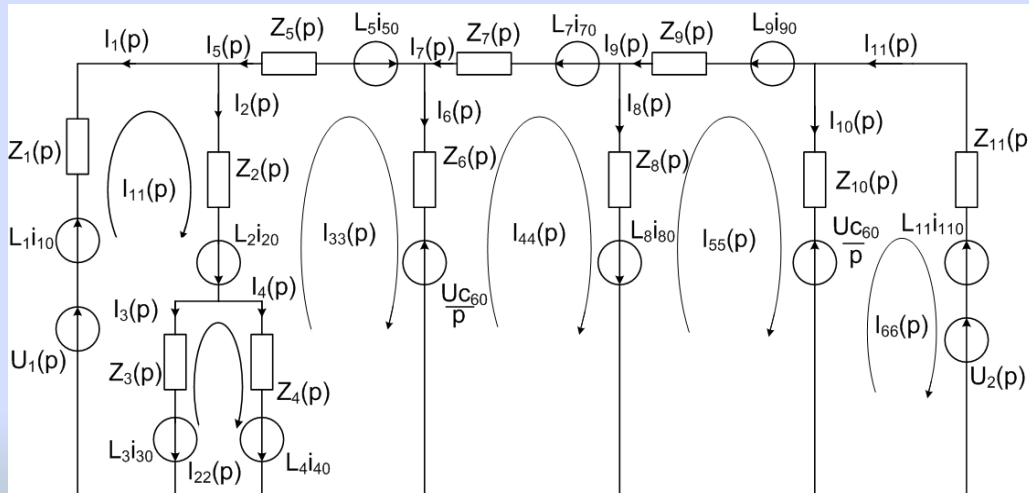
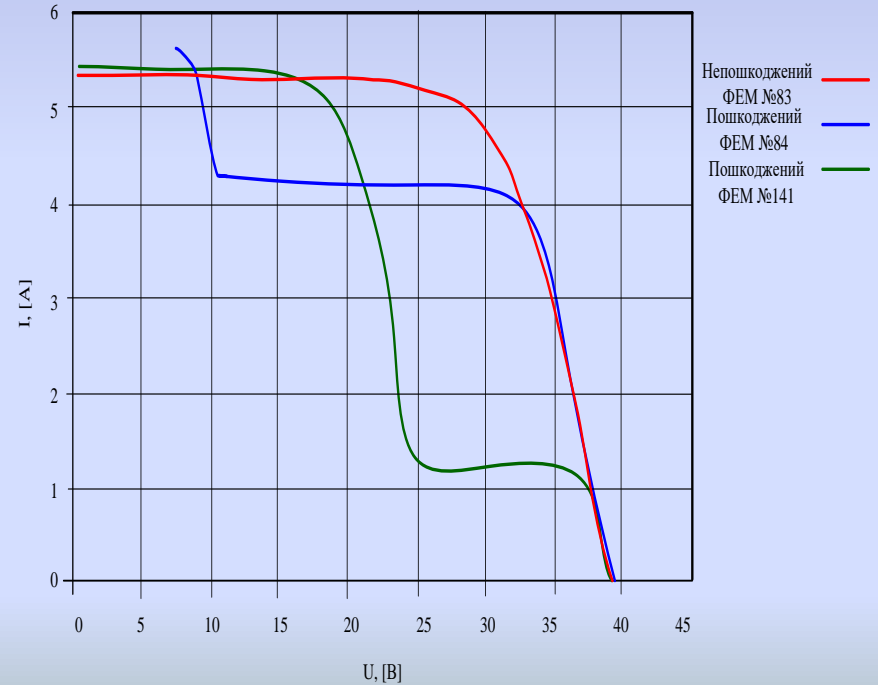
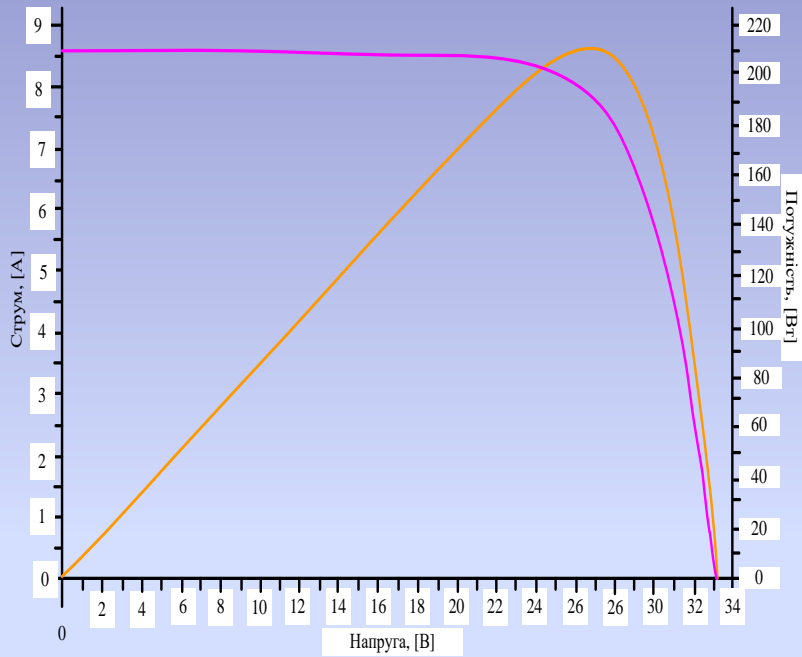


Рис. 2 Розрахункова схема в операторній формі запису

ТЕХНІЧНИЙ СТАН ФЕС та ФЕМ



Дерево пошкоджень ФЕМ

15

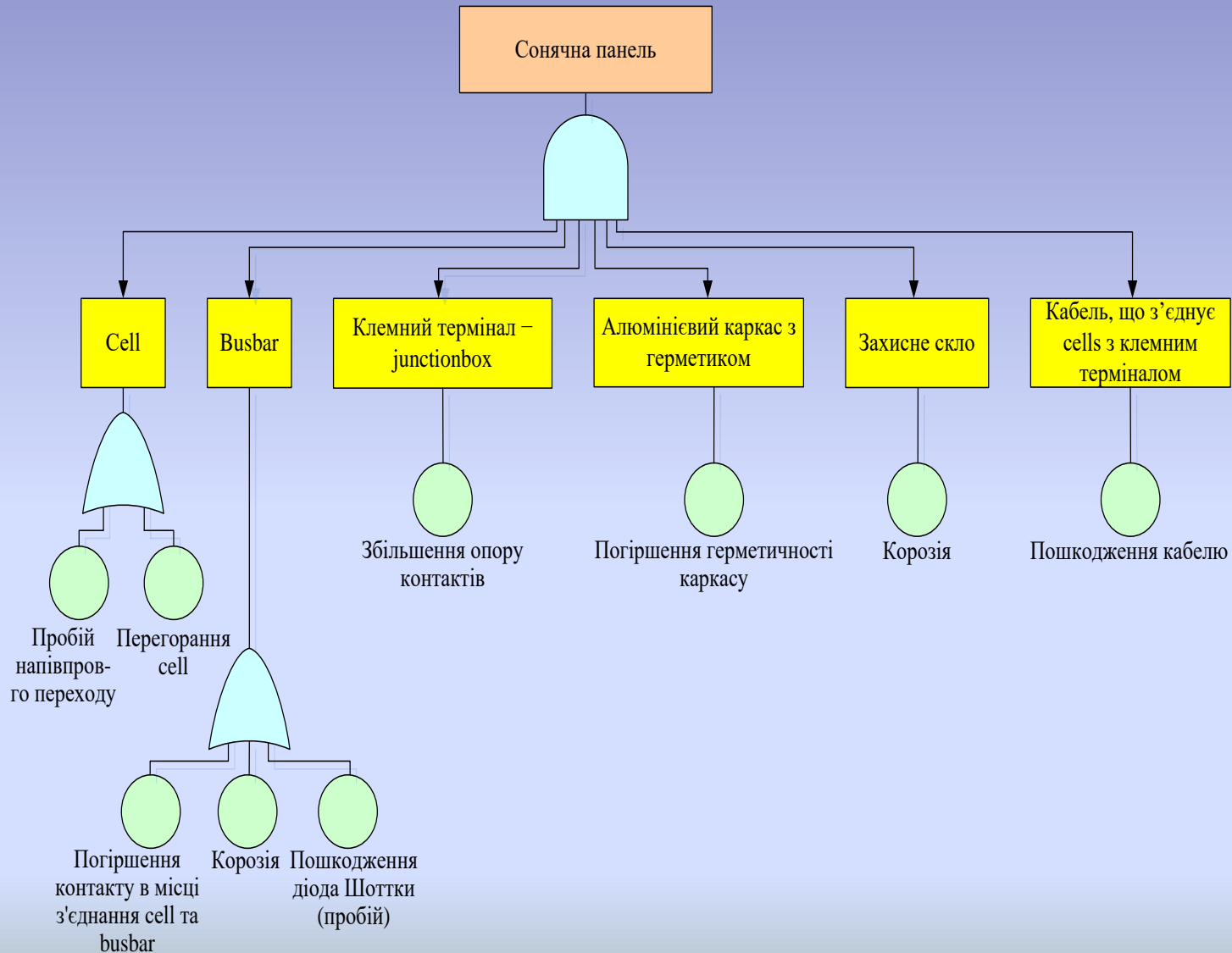


Рис. 1 - Дерево пошкоджень ФЕМ

Пошкодження ФЕМ

16

Вид пошкодження	Кількість		Причина
	-	%	
повітряне забруднення	128	39,7	пиловий шар і сліди деградація
деградація cells	117	27,2	зміна кольору
hotspot (гарячі точки)	37	8,5	локальне перегрівання
мікротріщини	36	8,4	пошкодження
дефект металу	34	8,1	пошкодження провідників
дефект шини (bus)	19	4,4	корозія пайки
«сліди равликів»	18	4,1	деградація матеріалу
низька прозорість	15	3,7	скло, (ethylene-vinyl acetate – EVA degradation) розпад етиленвінілацетату
пожовтіння	9	2,1	EVA degradation
локальні забруднення	8	1,9	екскременти птахів
пошкодження connector box (з'єднувальної коробки)	5	1,2	коррозія і деградація cells
пошкодження з'єднань	3	0,9	перегрівання, корозія
вода в панелях	1	0,4	розшарування
пошкодження скла та захисної плівки	1	0,4	механічний вплив

Пошкодження, виявлені влітку 2019/2020 років ФЕМ

17

Рік	ФЕМ	Інвертори	Кабелі	Конструкція	Інші	Генерування електроенергії, [%]
2004	0	0	0	0	5	100
2005	0	0	0	0	0	101
2006	0	0	0	0	0	101
2007	0	0	0	0	1	102
2008	0	1	0	0	0	103
2009	0	0	0	0	0	101
2010	0	0	0	0	0	103
2011	0	0	0	0	0	102
2012	0	0	0	0	0	101
2013	2	0	0	0	1	104
2014	2	0	0	1	0	100
2015	2	0	0	0	0	99
2016	2	0	0	0	2	99
2017	2	0	0	0	1	100
2018	2	0	0	0	1	99

У таблиці детально представлені пошкодження, виявлені влітку 2019/2020 років ФЕМ. Цифри означають кількість пошкоджених панелей, а не кількість конкретних дефектів. Основною причиною пошкодження ФЕМ є деградація cells, тому загальна кількість дефектних панелей становить 116. Масова деградація окремих панелей була виявлена щорічними вимірюваннями 2019/2020. Усі випадки зведені в таблиці.

Основні дефекти ФЕМ які експлуатуються на закордонних ФЕС

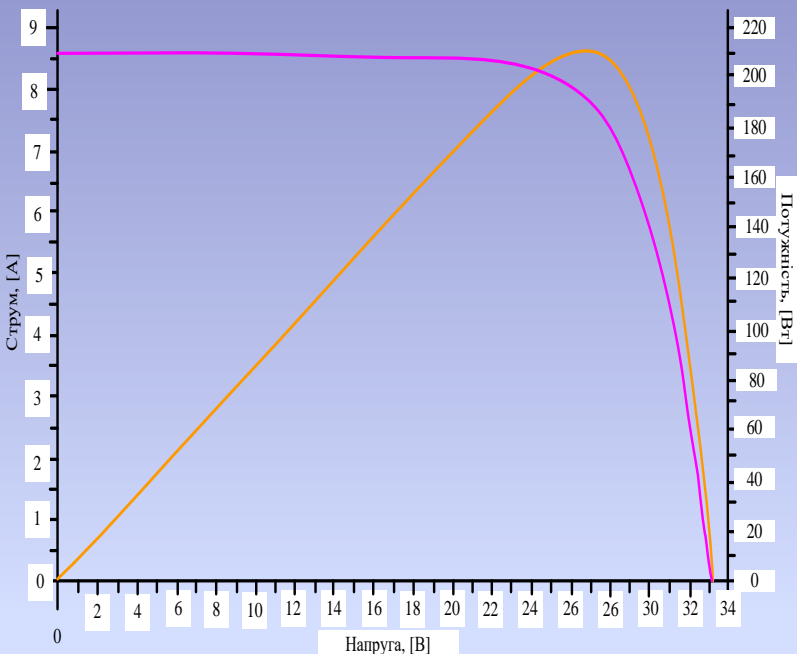


Рис. 1 - ВАХ ФЕМ №1

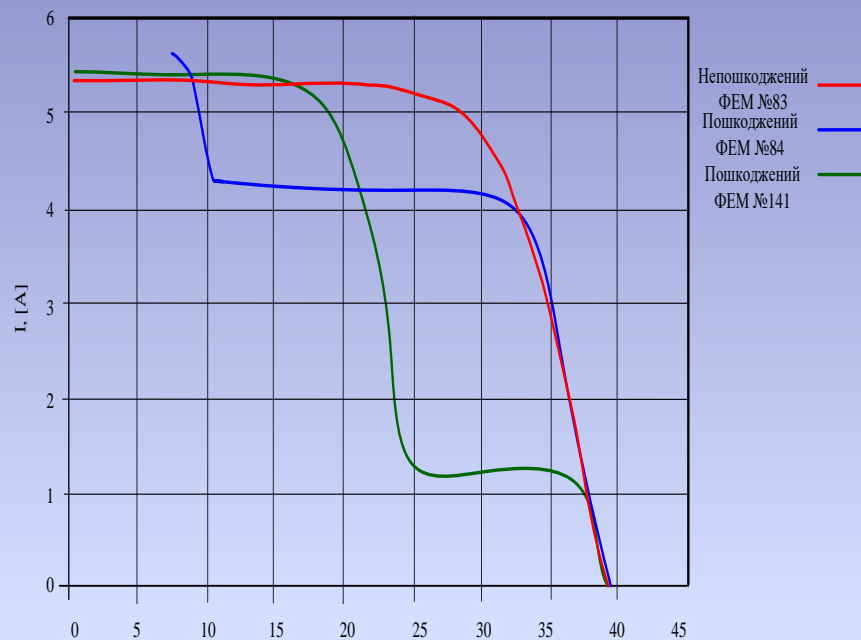


Рис. 2 - ВАХ ФЕМ №83, №84, №141

№ ФЕМ	P_m , [Вт]	U_{oc} , [В]	U_m , [В]	I_m , [А]	I_{sc} , [А]	I , [Вт·м ⁻²]	T , [°С]	FF, [%]
83	142,98	38,96	29,44	4,86	5,34	731,00	17,4	69
84	132,97	39,10	32,44	4,10	5,61	786,00	19,00	61
141	94,86	39,01	19,15	4,95	5,42	745,00	19,40	45

P_m , [Вт] – максимальна потужність; U_{oc} , [В] – напруга холостого ходу; U_m , [В] – напруга при якій ФЕМ генерує максимальну потужність; I_m , [А] – струм при якому ФЕМ генерує максимальну потужність; I_{sc} , [А] – струм короткого замикання; I – сонячне опромінення, [Вт·м⁻²]; T , [°С] – температура навколишнього середовища; Фактор заповнення (FF, %) – це, по суті, показник якості ФЕМ. Він розраховується шляхом порівняння максимальної потужності з теоретичною потужністю, яка виводилася б як при напрузі розімкнутого контуру, так і при струмі короткого замикання. «Коефіцієнт заповнення», більш відомий під аббревіатурою «FF», є параметром, який у поєднанні з V_{oc} та I_{sc} визначає максимальну потужність сонячної батареї. FF визначається як відношення максимальної потужності сонячної батареї до добутку V_{oc} та I_{sc}

Основні дефекти ФЕМ які експлуатуються на закордонних ФЕС

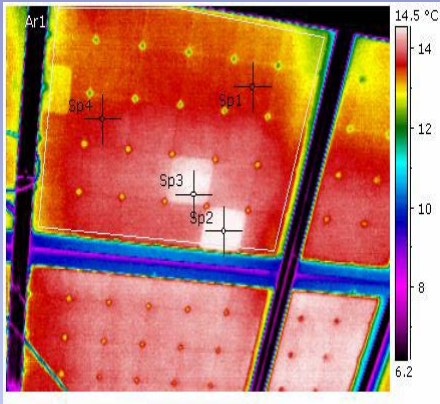


Рис.1 - Термограма панелі 84



Рис. 2 - Розшарування та деградація cells ФЕМ.

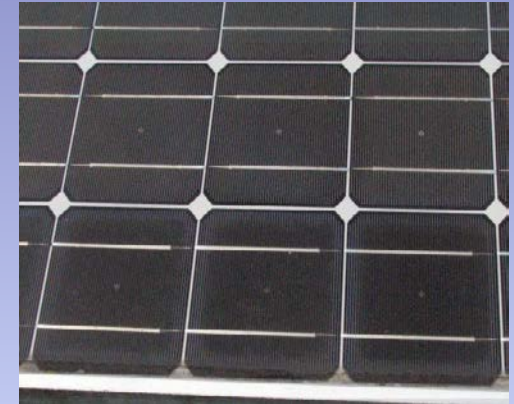


Рис. 3 - Деградація cells



Рис. 4 - Деградація cells



Рис. 5 - «Hotspot» (ФЕМ №67)



Рис. 6 - Пошкодження EVA (пошкодження етилен-вінілацетатового покриття ФЕМ).

Основні дефекти ФЕМ які експлуатуються на закордонних ФЕС

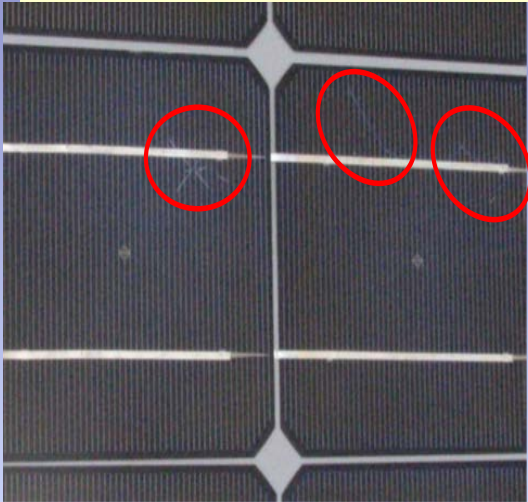


Рис. 1 - Мікро-тріщини (ФЕМ №104)



Рис. 2 - Вплив забруднення

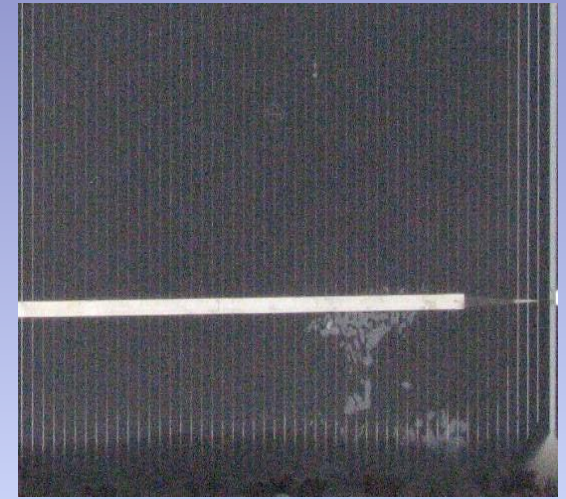


Рис. 3 - Дефект «Сліди равликів» (ФЕМ №88)

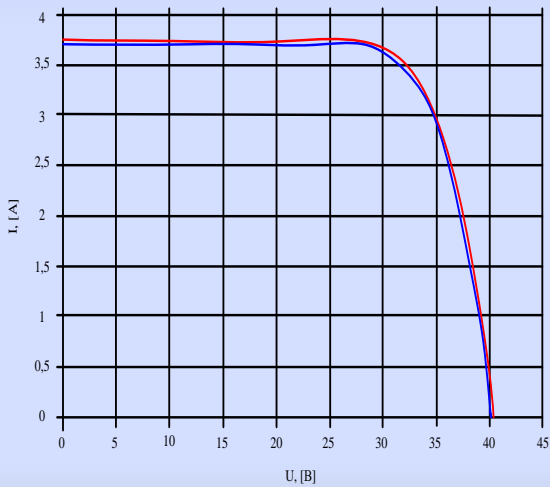


Рис. 4 - ВАХ ФЕМ №87 та ВАХ ФЕМ №88

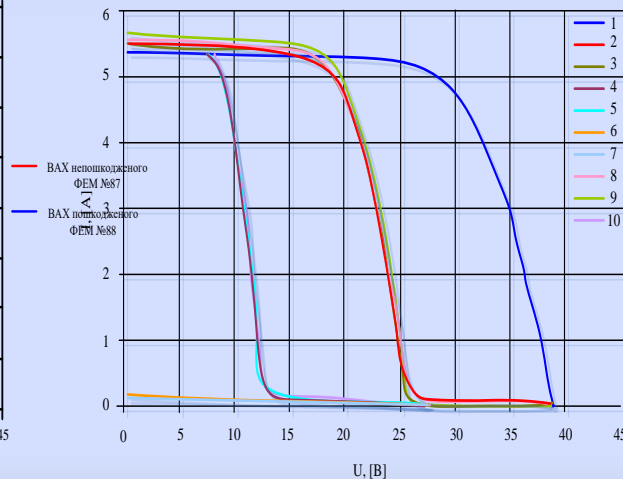


Рис. 5 - ВАХ непошкодженого ФЕМ та ВАХ пошкоджених ФЕМ з різними дефектами

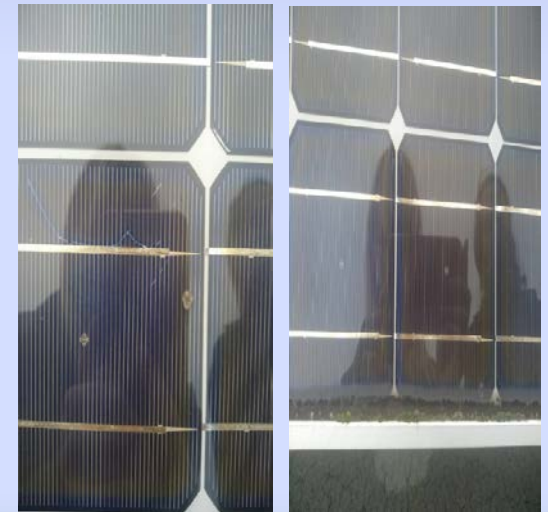


Рис. 6 - Мікро-тріщини на склі та пошкодження герметика дефектами



Рис. 1 - Пошкодження каркасу ФЕМ (пошкодження герметика, пошкодження рамки, пошкодження кріплення)



Рис. 2 - Пошкодження герметика ФЕМ та склопакету



Рис. 3 - Помилки монтажу та значне вигинання каркасу ФЕМ



Рис. 4 - Зростання опору та нагрів контактів в місці з'єднання sells busbar ФЕМ



Рис. 5 - Зростання опору та нагрів контактів в місці з'єднання sells між собою або пошкодження діоду Шоттки



Рис. 1 - Клемний термінал junctionbox – місце можливого перегріву



Рис. 2 - Результати пошкодження ізоляції та контактних з'єднань

Визначення коефіцієнту загального залишкового ресурсу ФЕМ

$$k_{рес} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}} \quad (1)$$

де k_{τ} – коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ по τ -му діагностичному параметру (вважаємо, що кожний контрольований діагностичний параметр, наприклад, температура, опір ізоляції, струм, напруга та інші впливають на залишковий ресурс елементів ФЕМ за мультиплікативним виразом (1), а кожний із діагностичних параметрів $k_1 - k_6$ впливає на коефіцієнт загального залишкового ресурсу всього ФЕМ), τ – τ -тий діагностичний параметр, ν – кількість діагностичних параметрів відповідно до кількості вузлів, p_{τ} – ймовірність відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра (2):

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (2)$$

де y_{τ} – кількість відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю τ -го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення, m_2 – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

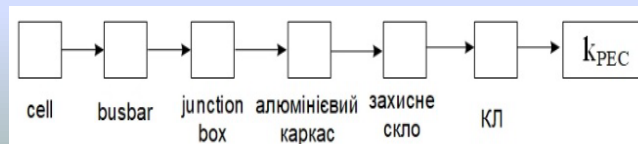


Рис. 1 - Структурна схема моделі коефіцієнту залишкового ресурсу ФЕМ

Визначення коефіцієнту загального залишкового ресурсу ФЕМ

Відповідно до виразу (1) коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ визначається за виразом:

$$k_{\text{заг.рес}} = k_1^{p_{k1}} \cdot k_2^{p_{k2}} \cdot k_3^{p_{k3}} \cdot k_4^{p_{k4}} \cdot k_5^{p_{k5}} \cdot k_6^{p_{k6}} \quad (1)$$

де $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу по відповідних діагностичних параметрах, $p_{k1}, p_{k2}, p_{k3}, p_{k4}, p_{k5}, p_{k6}$ – ймовірності пошкоджень вузлів ФЕМ, виявлених шляхом контролю діагностичних параметрів з урахуванням загальної кількості пошкоджень. Так, відповідно до табл. 1: $p_{k1}=0.034$ в.о., $p_{k2}=0.014$ в.о., $p_{k3}=0.833$ в.о., $p_{k4}=0.018$ в.о., $p_{k5}=0.027$ в.о., $p_{k6}=0.075$ в.о.

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ було використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ФЕМ, але жоден з даних параметрів не в повній мірі характеризує технічний стан, він лише вказує на певні зміни технічного стану ФЕМ.

За допомогою програмного забезпечення MATLAB створена математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ. З цією метою створено та скореговано вибірку навчальних даних, за якими отримано аналітичну залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Отримана залежність може бути використана у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування ФЕМ.

ВИСНОВКИ

1. Інвестиції на ВДЕ ідуть, а в електричні мережі кошти, співрозмірні з ВДЕ, не вкладаються. Звідси: ВДЕ впливають на техніко-економічні показники електричних мереж, і далеко не завжди позитивно, а компенсувати цей вплив особливо нічим. Є дві форми підтримки ВДЕ: «зелений тариф» до 30 року та аукціони на 20 років. Відсутні узаконені форми обмеження росту виданих дозволів на будівництво ФЕС і ВЕС. Електричні мережі не можуть з цим справитись. Якщо прийняти це як даність, то повинні бути стимули (інвестиції) для розбудови маневрових потужностей, накопичувачів електроенергії. Якщо в державному масштабі, то повинна бути стратегія узгодженої розбудови генерування і індустріального споживання електроенергії. А звідси розвиток електричних мереж, які їх об'єднують. Свого роду повинен бути план ГОЕЛРО.

2. Щодо балансування системи з ВДЕ. Очевидно, що повинна бути передбачена компенсація нестабільності генерування ВДЕ. Тут можуть бути варіанти: накопичувачі електроенергії – індивідуальні і групові, маневрові потужності – газотурбінні, парогазові та поршневі установки, системний резерв. Все це як платні послуги. За критичних ситуацій диспетчер має право обмежувати генерування, яке технічно повинне бути забезпечене.

3. Оскільки ВДЕ впливають на техніко-економічні показники електричних мереж, як правило, збільшуються втрати електроенергії та погіршується її якість, то на етапі формування ТУ повинно детально це враховуватися. Ідеально було б одночасно з будівництвом станцій модернізувати відповідні мережі, інтелектуалізуючи їх і наближаючи до «розумних».

Дякую за увагу!