

А. І. САЧЕНКО

аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8274-190X

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Використання відновлюваних джерел енергії є найбільш пріоритетним напрямком енергетичної політики України, яка спрямована на заощадження традиційних паливно-енергетичних ресурсів, поліпшення стану оточуючого середовища та запобігання зміні клімату. Враховуючи кліматичні та географічні особливості території України, економічно доцільним вважається використання генеруючих установок на основі сонячної та вітрової енергії. На цей час, найбільшого поширення на території України набули установки на основі сонячної енергії – сонячні електростанції (СЕС), сумарна встановлена потужність яких, станом на 2022 рік становить 7 751 МВт, що на 6 % більше ніж у попередньому році.

Інтеграція СЕС в розподільні електричні мережі з подальшою їх паралельною роботою призводить до переходу від пасивного централізованого електропостачання, до активного децентралізованого. За умови співрозмірної потужності електричної мережі та СЕС виникає зміна режиму роботи першої, що в режимах мінімального навантаження призводить до підвищення рівня напруги на шинах приєднання СЕС до РЕМ.

Таким чином, виникає потреба в дослідженні та розробці технологічних рішень, спрямованих на оптимізацію інтеграції мережевих сонячних електростанцій з метою покращення показників якості електричної енергії у системах розподілу з номінальною напругою 10 кВ.

Одним із таких рішень є удосконалення системи автоматичного керування (САК) генерацією активної потужності СЕС, що дозволить керувати величиною відхилення напруги в точці приєднання до електричної мережі, шляхом обмеження потужності визначеними уставками. За такого підходу, значення відхилення напруги завжди буде в допустимих межах.

Однак, такого роду керування не враховує можливість інверторів СЕС впливати на несиметрію напруг та режими реактивної потужності.

Сучасні РЕМ характеризуються значною неоднорідністю. Наявність великої кількості потужних однофазних споживачів, а також трифазних споживачів, які працюють не одночасно, є однією з причин виникнення несиметрії напруг в мережах 10 кВ.

Враховуючи це, задача удосконалення САК режимами роботи РЕМ з СЕС, реалізація якої дозволить досягнути одночасного зниження рівня усталеного відхилення напруги, рівня несиметрії напруг, та рівня споживання реактивної потужності за умови максимально можливого значення генерації електроенергії є актуальною.

Ключові слова: сонячні електростанції, багатокритеріальна оптимізація, показники якості електричної енергії.

А. І. SACHENKO

Postgraduate Student at the Department of Automation of Production Processes
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0001-8274-190X

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE OPERATION MODES OF THE POWER DISTRIBUTION NETWORK WITH SOLAR POWER PLANTS UNDER UNBALANCED LOAD

The use of renewable energy sources is the most priority direction of Ukraine's energy policy, which is aimed at saving traditional fuel and energy resources, improving the environment and preventing climate change. Taking into account the climatic and geographical features of the territory of Ukraine, it is considered economically feasible to use generating units based on solar and wind energy. At the moment, solar power plants (SPPs) have become the most widespread in Ukraine, the total installed capacity of which is 7,751 MW as of 2022, which is 6% more than in the previous year.

The integration of SPPs into power distribution networks (PDN) with their subsequent parallel operation leads to the transition from passive centralized power supply to active decentralized power supply. Under the condition of commensurate power of the electric network and SPP, there is a change in the operation mode of the first, which in the minimum load modes leads to an increase in the voltage level on the buses connecting the SPP to the PDN.

Thus, there is a need for research and development of technological solutions aimed at optimizing the integration of grid solar power plants in order to improve the quality of electric energy in distribution systems with a nominal voltage of 10 kV.

One of these solutions is the improvement of the automatic control system (ACS) of the generation of active power of the SPP, which will allow controlling the amount of voltage deviation at the point of connection to the electrical network, by limiting the power to specified settings. With this approach, the value of voltage deviation will always be within acceptable limits.

However, this kind of control does not take into account the ability of SPP inverters to influence voltage unbalance and reactive power modes.

Modern PDNs are characterized by considerable heterogeneity. The presence of a large number of powerful single-phase consumers, as well as three-phase consumers that do not work at the same time, is one of the reasons for voltage unbalance in 10 kV networks.

Taking this into account, the task of improving the ACS with modes of operation of PDN with SPP, the implementation of which will allow to achieve a simultaneous reduction in the level of steady-state voltage deviation, the level of voltage unbalance, and the level of reactive power consumption under the condition of the maximum possible value of electricity generation, is relevant.

Key words: solar power plants, multi-criteria optimization, power quality indicators.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання удосконалення системи автоматичного керування режимами роботи РЕМ з СЕС розглядалося в роботах [1–3].

В роботі [1] запропоновано САК режимом роботи РЕМ із СЕС, яка заснована на застосуванні ковзного режиму. Такий підхід дозволяє підвищити рівень генерації активної потужності СЕС та керувати режимами реактивної потужності в РЕМ. Основним недоліком запропонованої САК є не врахування впливу інверторів СЕС на рівень несиметрії напруги.

В статті [2] запропоновано САК режимом роботи РЕМ із СЕС, робота якої заснована на двохконтурному методі керування. Використання такої САК дозволяє не лише керувати рівнем напруги в точці приєднання інвертора до мережі, але й впливати на режим реактивної потужності СЕС. Основним недоліком цієї САК є неврахування можливості інвертора СЕС впливати на несиметрію напруги в РЕМ.

В роботі [3] запропонована САК параметрами режиму РЕМ із СЕС, що базується на розв'язках задачі векторної оптимізації. Такого роду САК дозволяє впливати на величину відхилення напруги, при умові максимальної генерації активної потужності СЕС. Недоліком запропонованої САК є неврахування впливу інвертора СЕС на режими реактивної потужності РЕМ.

Як бачимо, загальним недоліком запропонованих в роботах [1–3] САК режимами роботи РЕМ із СЕС є неврахування в повній мірі багатфункціонального впливу інверторів СЕС на режими роботи РЕМ (зокрема на показники якості електроенергії, такі як усталене відхилення та несиметрія напруг).

Формулювання мети дослідження

Метою цієї статті є розробка та дослідження роботи САК режимами роботи РЕМ з СЕС, за умови забезпечення максимально можливого рівня генерації активної потужності та одночасного дотримання допустимого рівня усталеного відхилення напруги, рівня несиметрії напруги та рівня споживання реактивної потужності.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

розробити структурну схему САК режимом роботи РЕМ з СЕС при несиметричному навантаженні та алгоритм розрахунку вектору керування;

створити комп'ютерну імітаційну модель САК режимами роботи РЕМ з СЕС при несиметричному навантаженні;

визначити ефект від застосування розробленого алгоритму автоматичного керування режимами роботи РЕМ з СЕС при несиметричному навантаженні, шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання.

Викладення основного матеріалу дослідження

В роботі [4] було показано, що задачу автоматичного керування режимами роботи РЕМ з СЕС при несиметричному навантаженні доцільно розглядати як задачу багатокритеріальної (векторної) оптимізації:

$$\begin{cases} -P_{\Sigma \text{ген}}(\mathbf{S}_{\text{ген}}) \rightarrow \min, \\ |\operatorname{tg} \varphi(\mathbf{S}_{\text{ген}})| = \frac{Q_{\Sigma \text{ген}}(\mathbf{S}_{\text{ген}})}{P_{\Sigma \text{ген}}(\mathbf{S}_{\text{ген}})} \rightarrow \min, \\ |\Delta U_1(\mathbf{S}_{\text{ген}})| = U_1(\mathbf{S}_{\text{ген}}) - U_{\text{ном}} \rightarrow \min, \\ U_2(\mathbf{S}_{\text{ген}}) \rightarrow \min, \\ \mathbf{S}_{\text{ген}} \in \Omega, \end{cases} \quad (1)$$

де $\mathbf{S}_{\text{ген}} = (\underline{S}_{\text{ген}A}, \underline{S}_{\text{ген}B}, \underline{S}_{\text{ген}C})$ – вектор фазних потужностей генерації СЕС (вектор керування);
 $\underline{S}_{\text{ген}i} = P_{\text{ген}i} + jQ_{\text{ген}i}, i = A, B, C$ – комплекс повної потужності генерації СЕС для i -ї фази;
 $\Omega \in \mathbb{C}^3 \mid \underline{S}_{\text{ген}i}^{\min} \leq \underline{S}_{\text{ген}i} \leq \underline{S}_{\text{ген}i}^{\max}, i = A, B, C$ – область допустимих значень вектора керування $\mathbf{S}_{\text{ген}}$;
 $\underline{S}_{\text{ген}i}^{\min}, \underline{S}_{\text{ген}i}^{\max}, i = A, B, C$ – мінімально та максимально допустимі значення вектора керування $\mathbf{S}_{\text{ген}}$;

$\Delta U_1(\mathbf{S}_{\text{ген}})$ – різниця значень модуля комплексу напруги прямої послідовності \underline{U}_1 та номінальної напруги РЕМ $U_{\text{ном}}$;

$U_1(\mathbf{S}_{\text{ген}})$ – значення модуля комплексу напруги прямої послідовності;

$\text{tg}\varphi(\mathbf{S}_{\text{ген}})$ – коефіцієнт реактивної потужності в режимі генерації;

$Q_{\Sigma\text{ген}} = \text{Im}(\underline{S}_{\Sigma\text{ген}})$ – трифазна реактивна потужність, що генерується в мережу;

$P_{\Sigma\text{ген}} = \text{Re}(\underline{S}_{\Sigma\text{ген}})$ – трифазна активна потужність, що генерується в мережу.

Комплекс повної трифазної потужності, що генерується в мережу $\underline{S}_{\Sigma\text{ген}}$ визначається за формулою:

$$\underline{S}_{\Sigma\text{ген}} = \underline{S}_{\text{ген}} - \underline{S}_{\text{н}} = \sum_{i=1}^3 [P_{\text{ген}i} - P_{\text{н}i} + j(Q_{\text{ген}i} - Q_{\text{н}i})] \quad (2)$$

де $\underline{S}_{\text{н}}$ – комплекс повної потужності навантаження:

$$\underline{S}_{\text{н}} = \sum_{i=1}^3 (P_{\text{н}i} + jQ_{\text{н}i}) \quad (3)$$

$U_2(\mathbf{S}_{\text{ген}})$ – значення модуля комплексу напруги зворотної послідовності;

Як зазначено в роботах [5; 6], найбільш підходящим методом вирішення задач (1) є метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв. Для випадку задачі (1) координатами утопічної точки будуть мінімальні значення кожного з критеріїв $Q_{\text{ут}} = (-P_{\Sigma\text{ген} \min}, \text{tg}\varphi_{\min}, \Delta U_{1 \min}, U_{2 \min})$.

Як показано в роботі [5], вирішення задачі (1) найдоцільніше здійснювати шляхом використання чебишевської метрики ($p \rightarrow \infty$).

В задачах багатокритеріальної оптимізації виникає ряд проблем, пов'язаних з нормалізацією різнорідних критеріїв та урахування їх пріоритетності. Основна мета нормалізації полягає у зведенні критеріїв оптимізації до єдиного безрозмірного масштабу, за умови відсутності залежності критеріїв від масштабу вимірювання та зменшення їх значущості. Враховуючи цей факт було обрано спосіб нормалізації за наступною формулою [7]:

$$N_i^1(Q_i) = \frac{Q_i - Q_i^{\min}}{Q_i^{\max} - Q_i^{\min}}, \quad (4)$$

де Q_i^{\min} – максимальне значення i -го критерію оптимізації на множині допустимих альтернатив;

Q_i^{\max} – мінімальне значення i -го значення критерію оптимізації на множині допустимих альтернатив.

При розв'язанні задач багатокритеріальної оптимізації в електроенергетиці (i не тільки) виникає складність проведення експертизи та трудомісткість отримання вихідної експертної інформації, яка часто є неповною та суперечливою. У цих об'єктивно існуючих умовах доцільно обирати такі методи, які потребують найменшого часу спілкування з експертами. Цій умові найповніше відповідає група методів попарного порівняння з обробкою інформації в первинних шкалах. До цієї групи методів визначення вагових коефіцієнтів належать методи Уея, Сааті та Коггера і Ю [8].

На основі порівняльного аналізу [9], встановлено, що найкраще виконує поставлене завдання метод аналізу ієрархій (метод Сааті), який не потребує тривалого часу на спілкування з експертами та має високій ступінь узгодженості оцінок для різних експертів. Тому саме цей метод і був застосований для визначення вагових коефіцієнтів.

За такого підходу знаходження кінцевого розв'язку задачі (1), шляхом використання чебишевської метрики, матиме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \left\{ \begin{array}{l} \xi_1 \cdot [N(Q_1(\mathbf{S}_{\text{ген}})) - N(Q_1^{\min}(\mathbf{S}_{\text{ген}}))], \\ \xi_2 \cdot [N(Q_2(\mathbf{S}_{\text{ген}})) - N(Q_2^{\min}(\mathbf{S}_{\text{ген}}))], \\ \xi_3 \cdot [N(Q_3(\mathbf{S}_{\text{ген}})) - N(Q_3^{\min}(\mathbf{S}_{\text{ген}}))], \\ \xi_4 \cdot [N(Q_4(\mathbf{S}_{\text{ген}})) - N(Q_4^{\min}(\mathbf{S}_{\text{ген}}))], \end{array} \right. \\ \mathbf{S}_{\text{ген}} \in \Omega \end{array} \right. \quad (5)$$

де $N(Q_i(S_{ген}))$ – нормалізоване значення i -го критерія оптимізації;

$N(Q_i^{min}(S_{ген}))$ – мінімальні (утопічні) значення i -го критерія оптимізації;

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ – нормалізовані вагові коефіцієнти, що враховують відносну важливість кожного з критеріїв.

На рис. 1 зображена структурна схема САК режимами роботи РЕМ з СЕС при несиметричному навантаженні, робота якої заснована на розв’язках задачі (1).

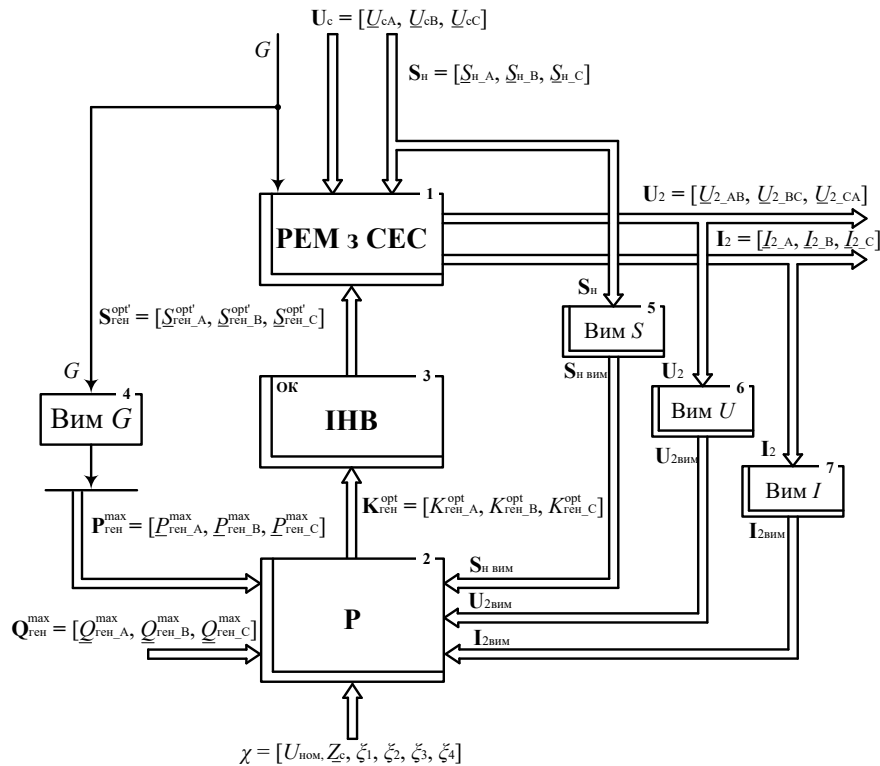


Рис. 1. Структурна схема САК режимами роботи РЕМ з СЕС при несиметричному навантаженні

На рис. 1: G – інтенсивність сонячного випромінювання; $U_c = [U_{cA}, U_{cB}, U_{cC}]$ – вектор комплексної напруги, яка підтримується в розподільній електричній мережі; $S_n = [S_{nA}, S_{nB}, S_{nC}]$ – вектор комплексної потужності навантаження; $U_2 = [U_{2AB}, U_{2BC}, U_{2CA}]$ – вектор комплексної напруги в точці загального приєднання (на шинах споживачів); $I_2 = [I_{2A}, I_{2B}, I_{2C}]$ – вектор комплексного струму в лінії електропередачі; $S_{n\text{вим}} = [S_{n\text{вим}A}, S_{n\text{вим}B}, S_{n\text{вим}C}]$ – вектор вимірюваного значення комплексної потужності навантаження; $U_{2\text{вим}} = [U_{2\text{вим}AB}, U_{2\text{вим}BC}, U_{2\text{вим}CA}]$ – вектор вимірюваного значення комплексної напруги в точці загального приєднання (на шинах споживачів); $I_{2\text{вим}} = [I_{2\text{вим}A}, I_{2\text{вим}B}, I_{2\text{вим}C}]$ – вектор вимірюваного значення комплексного струму в лінії електропередачі; $\chi = [U_{ном}, Z_c, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4]$ – вектор постійних параметрів; $P_{ген}^{max} = [P_{генA}^{max}, P_{генB}^{max}, P_{генC}^{max}]$ – вектор максимальних значень активної потужності генерації трифазної СЕС; $Q_{ген}^{max} = [Q_{генA}^{max}, Q_{генB}^{max}, Q_{генC}^{max}]$ – вектор максимальних значень реактивної потужності генерації трифазної СЕС; $K_{ген}^{opt} = [K_{генA}^{opt}, K_{генB}^{opt}, K_{генC}^{opt}]$ – вектор оптимального керування, який визначається регулятором; $K_{генi}^{opt} = [P_{генi}^{opt}/P_{генi}^{max}, Q_{генi}^{opt}/Q_{генi}^{max}]$ – складова матриці векторів оптимального керування для i -ї фази відповідно, що визначені регулятором; $S_{ген}^{opt} = [S_{генA}^{opt}, S_{генB}^{opt}, S_{генC}^{opt}]$ – вектор значень комплексної потужності генерації СЕС, яка задається виконавчим пристроєм; 1 – розподільна електрична мереж з сонячною електростанцією; 2 – регулятор, який реалізує алгоритм визначення вектору оптимального керування; 3 – інвертор сонячної станції (об’єкт керування); 4 – вимірювач величини сонячного випромінювання; 5 – вимірювач трифазної потужності; 6 – вимірювач трифазної напруги в точці загального приєднання (на шинах споживачів); 7 – вимірювач трифазного струму в лінії електропередачі.

Алгоритм визначення вектору оптимального керування рівнем генерації активної та реактивної потужності ($S_{ген}^{opt}$) СЕС у складі РЕМ приведено на (рис. 2) у вигляді блок-схеми.

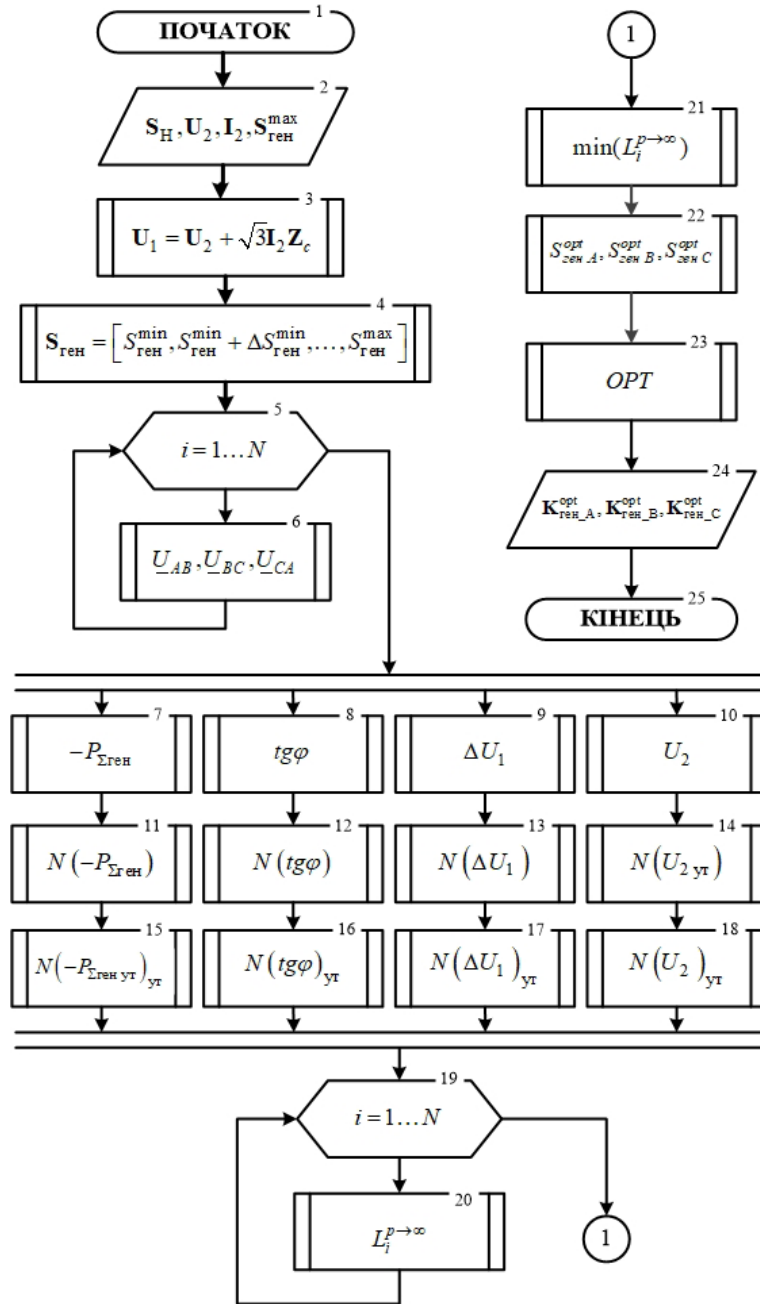


Рис. 2. Блок-схема алгоритму визначення оптимального вектору керування генерацією повної потужності СЕС в РЕМ

На рис. 2: 2 – процедура отримання даних про поточні параметри режиму роботи розподільної електричної системи та максимально можливого значення повної потужності (активної та реактивної) СЕС; 3 – процедура визначення напруги мережі за відомими параметрами мережі та виміряними значеннями потужності навантаження та струму в лінії; 4 – процедура дискретизації простору можливої потужності генерації СЕС; 6 – процедура розрахунку комплексів напруг на шинах споживачів, при відповідних значеннях потужності генерації із простору; 7 – процедура визначення критерію; 8 – процедура визначення критерію; 9 – процедура визначення критерію; 10 – процедура визначення критерію; 11, 12, 13, 14 – процедури нормалізації (приведення до безрозмірних величин) відповідних критеріїв; 15, 16, 17, 18 – процедури визначення координат утопічних точок нормалізованих критеріїв, які реалізуються методом повного перебору; 20 – процедура визначення за формулою (2.23) відстаней

від елементів множини парето-оптимальних розв’язків до променя, що виходить з утопічної точки; 21 – процедура пошуку мінімальної відстані від множини парето-оптимальних розв’язків до променя, що виходить з утопічної точки, яка реалізується методом повного перебору; 22 – процедура визначення оптимальної величини повної потужності генерації СЕС; 23 – процедура визначення оптимального вектору керування; 24 – процедура виведення оптимального вектору керування.

Вектор оптимального керування передається на виконавчий пристрій, де у відповідності до заданого значення уставки генерації в кожній фазі трифазної СЕС обирається найближче значення потужності генерації (активної та реактивної).

На рис. 3 представлена узагальнена комп’ютерна імітаційна модель САК режимами роботи PEM з СЕС при несиметричному навантаженні.

Модель містить наступні підсистеми: «Напруга U_c » – підсистема моделювання величини напруги PEM; «Навантаження» – підсистема моделювання навантаження споживачів; «СЕС» – підсистема моделювання роботи мережевої СЕС; «PEM» – підсистема моделювання роботи PEM; «Reg_SES» – підсистема моделювання роботи регулятора системи автоматичного керування генерацією активної та реактивної потужності СЕС; «Вимірювач параметрів режимів» – підсистема вимірювача показників режиму (критеріїв оптимізації).

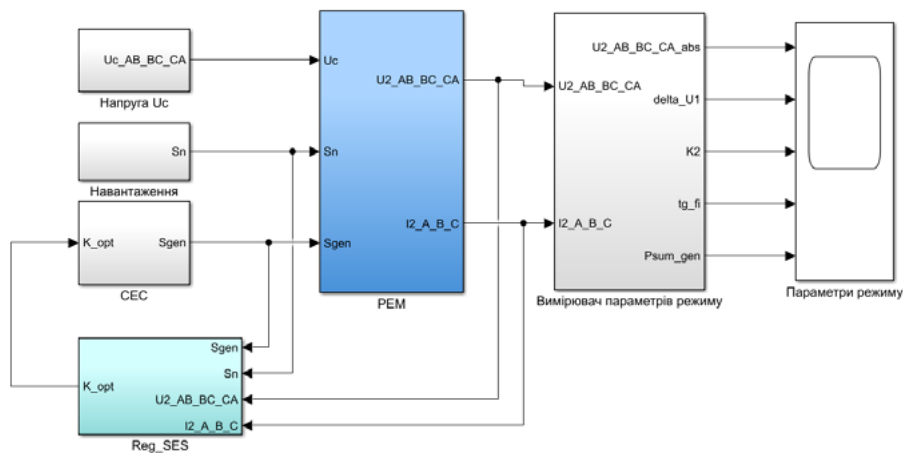


Рис. 3. Узагальнена комп’ютерна імітаційна модель САК режимами роботи PEM з СЕС при несиметричному навантаженні для MatLab Simulink

Для визначення ефекту від застосування розв’язку задачі керування (1) було проведено моделювання роботи розподільної електричної мережі напругою 10 кВ до якої підключена сонячна електростанція для таких випадків: при відсутності керування генерацією активної та реактивної потужності СЕС (модель 1); для базової моделі при такому керуванні генерацією активної потужності СЕС, що обмежує відхилення напруги на шинах споживачів значеннями 10% (модель 2); при розробленому оптимальному керуванні генерацією активної та реактивної потужності СЕС (модель 3).

Статистична обробка результатів моделювання полягала у визначенні інтегральної ймовірності потрапляння значення усталеного відхилення напруги ΔU , коефіцієнта реактивної потужності $tg\phi$ та коефіцієнта несиметрії за зворотною послідовністю K_2 на шинах споживачів у допустимі межі:

$$\begin{cases} P(\Delta U \leq \Delta U_{don}) = N_{don} / N_{\Sigma} \\ P(tg\phi \leq tg\phi_{don}) = N_{don} / N_{\Sigma} \\ P(K_2 \leq K_{2don}) = N_{don} / N_{\Sigma} \end{cases} \quad (6)$$

де P – інтегральна ймовірність показника в діапазон допустимих значень;

N_{don} – кількість значень величини, що входять в допустимі межі;

N_{Σ} – загальна кількість вимірювань показника.

Результати комп’ютерного моделювання роботи розподільної електричної мереж 10 кВ з СЕС при несиметричному навантаженні для означених випадків наведені на рис. 4–6.

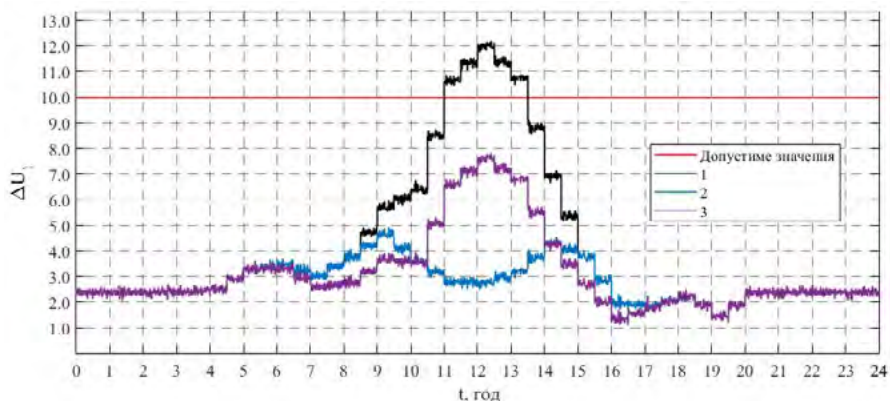


Рис. 4. Графік відхилення напруги на шинах споживачів:
1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

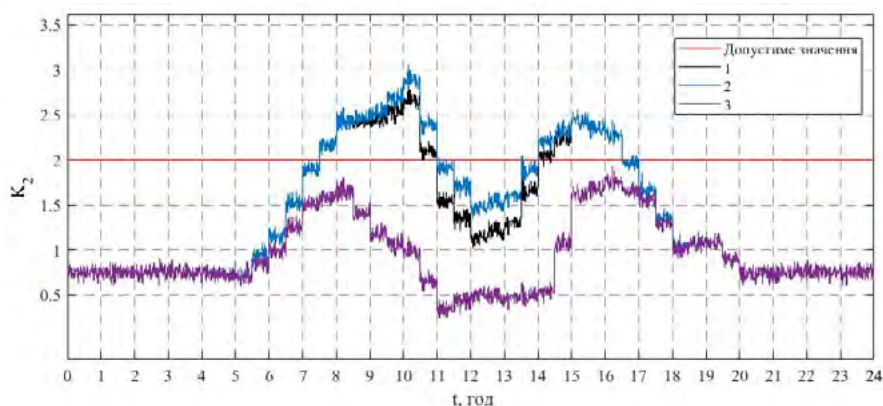


Рис. 5. Графік зміни коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю на шинах споживачів:
1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

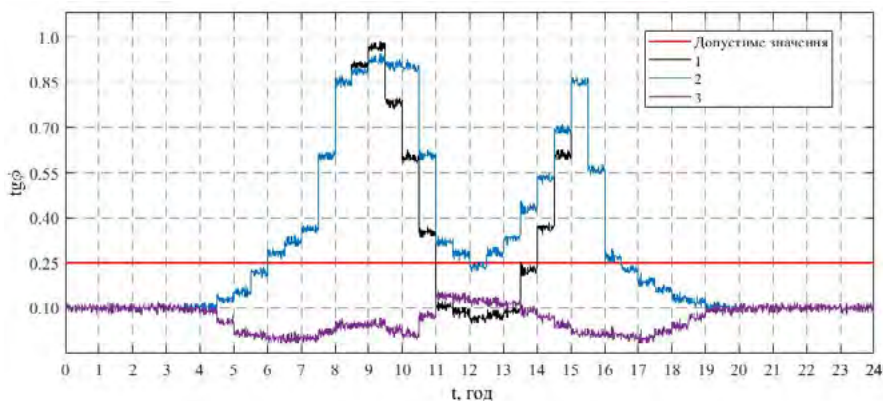


Рис. 6. Графік зміни коефіцієнта реактивної потужності на шинах споживачів:
1 – модель 1; 2 – модель 2; 3 – модель 3

Числові результати моделювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати комп'ютерного моделювання

№ з/п	Показник	Значення показника	
		Базова САК	Розроблена САК
1	Електроенергія, що генерується СЕС в мережу, кВт·год	716,1	767,3

Як бачимо, для випадку без керування генерацією активної та реактивної потужності СЕС показники усталеного відхилення та несиметрії напруг виходять за межі допустимих значень (10% та 2% відповідно) з інтегральною імовірністю 87,5% та 71,5%, що не задовольняє вимоги ДСТУ EN 50160:2014. В свою чергу, коефіцієнт реактивної потужності також знаходиться у недопустимих межах (менше 0,25) з інтегральною імовірністю 85%.

Для випадку базової моделі керування генерацією активної потужності СЕС, що обмежує відхилення напруги на шинах споживачів значеннями 10% вдається досягти 100% потрапляння усталеного відхилення напруги в точці приєднання СЕС до РЕМ в допустимі межі. Пороте інші показники майже не змінюються, та знаходяться в незадовільних межах.

Застосування розробленої САК дозволяє підвищити інтегральну імовірність потрапляння коефіцієнта реактивної потужності в допустимі межі на майже 42% порівняно з базовою моделлю, та коефіцієнта несиметрії на 29,2%. При цьому інтегральна імовірність потрапляння величини усталеного відхилення та несиметрії напруг становить 100%, що задовольняє вимоги ДСТУ EN 50160:2014. Також слід зауважити, що при застосуванні розробленої САК, збільшилася на 6,7% кількість виробленої електроенергії.

Отже, реалізація алгоритму оптимального керування генерацією активної та реактивної потужності СЕС в складі РЕМ при несиметричному навантаженні дозволяє забезпечувати показники усталеного відхилення на несиметрії напруг в межах, визначених ДСТУ EN 50160:2014, коефіцієнта реактивної потужності в дозволених межах та збільшити кількість виробленої електроенергії.

Висновки

На основі проведеного дослідження встановлено:

1. Задачу автоматичного керування режимами роботи РЕМ з СЕС при несиметричному навантаженні найдоцільніше розглядати як задачу багатокритеріальної (векторної) оптимізації, для вирішення якої, найкраще підходить метод наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

2. Розроблена структурна схема САК режимами роботи РЕМ з СЕС та алгоритм визначення вектору керування дали можливість створити комп'ютерну імітаційну модель САК режимами РЕМ з СЕС при несиметричному навантаженні.

3. За результатами комп'ютерного моделювання розробленої САК, показано її перевагу над базовою САК. Використання розробленої САК дозволяє забезпечувати показники усталеного відхилення на несиметрії.

Список використаної літератури

1. Bahri, H., Aboulfatah, M., Guisser, M., Abdelmounim, E., & El Malah, M. (2018). Sliding mode control of a three phase grid connected photovoltaic system with a nonlinear load. *International Review of Automatic Control*, 11(6), 293–303. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v11i6.11686> [in English]

2. WAN Qian, Xia Chengjun, Azeddine Houari, Zhao Xue1, Xia Chengjun, Zheng Xiaotian and Huang Chuyin (2020). The Reactive Power Support Strategy based on Dual-loop Control for Three-phase Grid-connected Inverter. 10th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE 2020), Volume 182. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018202011> [in English]

3. Плешков П.Г., Гарасьова Н.Ю., Солдатенко В.П. Оптимальне керування режимом роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика: зб. наук. пр. Харків : НТУ «ХПІ». 2018. № 32 (1308). С. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.12>*

4. Оптимальне керування режимами розподільних електричних мереж з сонячними електростанціями при несиметричному навантаженні / А. І. Саченко та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. № 6(37) Ч. 1. С. 37–44. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).1.37-44](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.37-44).*

5. Солдатенко В. П., Плешков С. П. Автоматичне керування режимами роботи комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. 2017. № 34(1256). С. 66–70. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vsрудmash_2017_34_14.*

6. Солдатенко В. П. Система автоматичного керування роботою комбінованої електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. технічні науки. проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. 2017. № 187. С. 37–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdusg_2017_187_16.*

7. Ус С.А. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. / С.А. Ус, Л.С. Коряшкіна; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т.– Д.: НГУ, 2014. – 300 с. URL: [https://sau.nmu.org.ua/ua/osvita/metod/Models_and_decision-making_techniques\(Us_Koryashkina\)_NMU_SAU.pdf](https://sau.nmu.org.ua/ua/osvita/metod/Models_and_decision-making_techniques(Us_Koryashkina)_NMU_SAU.pdf)

8. Літвінов В. В., Костерев М. В., Денисюк П. Л. Використання методів попарного порівняння для визначення пріоритетності способів забезпечення статичної стійкості асинхронних двигунів в умовах багатокритеріального

вибору. *Наукові вісті НТУУ «КПІ» : науково-технічний журнал*. 2010. № 2(70). С. 24–29. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0b684070-9146-43a5-8093-781e8e1c5419/content>

9. Медиковский М.О., Шуневич О. Б. Дослідження ефективності методів визначення вагових коефіцієнтів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2011. № 5. С. 120–123. URL: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2011_5/51_med.pdf

References

1. Bahri H., Aboufatah, M. Guisser, M. Abdelmounim, E., & El Malah M. (2018). Sliding mode control of a three phase grid connected photovoltaic system with a nonlinear load. *International Review of Automatic Control*, 11(6), 293–303. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireaco.v11i6.11686>

2. WAN Qian, Xia Chengjun, Azeddine Houari, Zhao Xue1, Xia Chengjun, Zheng Xiaotian and Huang Chuyin (2020). The Reactive Power Support Strategy based on Dual-loop Control for Three-phase Grid-connected Inverter. 10th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE 2020), Volume 182. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018202011>

3. Plieshkov P. H., Harasova N. Yu., & Soldatenko V. P. (2018). Optymalne keruvannia rezhymom roboty kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Optimal control of the operation mode of the combined electric power system with renewable energy sources]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Ser.: Problemy udoskonaliuvannia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka: Zb. nauk. pr. – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of improvement of electric machines and devices. Theory and practice: Collection of scientific works*, 32 (1308), 64–70. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.12> [in Ukrainian]

4. Sachenko A. I., Plieshkov S. P., Plieshkov P. H., & Zinzura V. V. (2022). Optymalne keruvannia rezhymamy rozpodilnykh elektrychnykh merezh z soniachnymy elektrostantsiiamy pry nesymetrychnomu navantazhenni [Optimal control of the modes of distribution electric networks with solar power plants with unbalanced load]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 6(37), p.1, 37–44. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).1.37-44](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).1.37-44) [in Ukrainian]

5. Soldatenko V. P., & Plieshkov S. P. (2017). Avtomatychne keruvannia rezhymamy roboty kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Automatic control of operating modes of a combined electric power system with renewable energy sources]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific papers. Series: Problems of improving electric machines and devices, 34(1256), 66–70. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/vsрудmash_2017_34_14 [in Ukrainian]

6. Soldatenko V. P. (2017). Systema avtomatychnoho keruvannia robotoiu kombinovanoi elektroenerhetychnoi systemy z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [The system of automatic control of the operation of the combined electric power system with renewable energy sources]. *Visnyk KhNTUSH im. P. Vasylenka. tekhnichni nauky. problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK ukrainy – Herald of KhNTUSG named after P. Vasylenko. Technical sciences. Series: Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine*, 187, 37–39 Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/vkhdtusg_2017_187_16 [in Ukrainian]

7. Us S. A., Koriashkina L. S. (2014) Modeli y metody pryiniattia rishen : navch. posib [Decision-making models and methods]. Dnipropetrovsk: NHU. Retrieved from [https://sau.nmu.org.ua/ua/osvita/metod/Models_and_decision-making_techniques\(Us_Koryashkina\)_NMU_SAU.pdf](https://sau.nmu.org.ua/ua/osvita/metod/Models_and_decision-making_techniques(Us_Koryashkina)_NMU_SAU.pdf) [in Ukrainian]

8. Litvinov V.V., Kosteriev, M.V., & Denysiuk P. L. (2010). Vykorystannia metodiv poparnoho porivniannia dlia vyznachennia priorytetnosti sposobiv zabezpechennia statychnoi stiiikosti asynkhronnykh dyvahuniv v umovakh bahatokryterialnoho vyboru [The use of pairwise comparison methods to determine the priority of ways to ensure the static stability of asynchronous motors in the conditions of multi-criteria selection]. *Naukovi visti NTUU «KPI»F – Scientific news of NTUU "KPI": Scientific and technical journal: Naukovo-tekhnichniy zhurnal*, 2(70), 24–29. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0b684070-9146-43a5-8093-781e8e1c5419/content> [in Ukrainian]

9. Medykovskyi, M.O., & Shunevych, O. B. (2011). Doslidzhennia efektyvnosti metodiv vyznachennia vahovykh koefitsiiientiv [Research on the effectiveness of methods for determining weighting factors]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 5, 120–123. Retrieved from http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2011_5/51_med.pdf [in Ukrainian]