

© Ю.А. Папаїка^{1,2}, М.М. Малишко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Дніпропетровський науково-дослідний інститут судових експертиз, Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

© Yu. Papaika^{1,2}, M. Malyshko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Dnipropetrovsk Research Institute of Judicial Examination, Dnipro, Ukraine

RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE LEVELS IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Мета. Дослідити рівні несинусоїдальності та несиметрії напруги у системі електропостачання феросплавного комбінату за умови компенсації реактивної потужності та наявності розподіленої генерації від сонячних електростанцій.

Методика. Аналіз рівнів електромагнітних завад виконано на основі даних експериментального моніторингу показників якості напруги багатоканальними реєстраторами, об'єднаних у SCADA. Моделювання виконано методами спектрального аналізу та швидкого перетворення Фур'є. Електромагнітні явища затухання завад у електричних мережах змодельовано схемами заміщення елементів електричних мереж з урахуванням поверхневого ефекту від протікання струмів вищих гармонік.

Результати. Отримано результати експериментального дослідження параметрів електричної енергії в умовах нелінійних та несиметричних навантажень промислового підприємства. Приєднання конденсаторних батарей (КБ) у вузол навантаження з децентралізованими джерелами енергії (сонячними електростанціями) суттєво змінює характер амплітудно-частотних характеристик та призводить до резонансних явищ. Методами імітаційного моделювання виявлено зони виникнення резонансних частот при обмеженні потужності енергосистеми.

Наукова новизна. Встановлені залежності показників несинусоїдальності напруги від параметрів системи електропостачання підприємства. Це дозволяє визначити критичні зони виникнення резонансних частот та створити умови недопущення експлуатаційних перенапруг при роботі пічного обладнання.

Практична значимість. Отримані дані розрахунку параметрів схеми заміщення системи електропостачання дозволяють визначити зміни умов виникнення резонансів напруги при пошкодженнях системи передачі та системних обмеженнях потужності навантаження внаслідок воєнних дій та нештатних ситуацій.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, якість електричної енергії, реактивна потужність, електромагнітний слід, нелінійні та несиметричні навантаження.

Вступ. Найбільшими споживачами електроенергії в Україні є феросплавні заводи з виробництва особливих сполук для металургійної галузі. До початку повномасштабного вторгнення обсяг споживання Нікопольського та Запорізького заводів феросплавів становив 5% всього споживання електроенергії в країні. Забезпечення електропостачання цих підприємств – це пріоритетні задачі та

виклики для енергетиків, враховуючи унікальні особливості електричних режимів даного виду виробництва:

- високі вимоги до надійності системи електропостачання насосів систем охолодження феросплавних печей;
- резервне живлення споживачів першої категорії (кільцева схема живлення на напругу 6–10 кВ);
- складність організації компенсації реактивної потужності в умовах збурень і гармонічних викривлень (вищі гармоніки та інтергармоніки).
- велика протяжність силових кабельних ліній напругою 6–10 кВ (сотні кілометрів, струми однофазного замикання на землю 100–130 А);
- велика потужність електропічних установок (до 75 МВт);
- особливості роботи з енергоринком за тарифом, диференційованим за часом доби. Це призводить до циклічності роботи машин та механізмів з частими зупинками та холостим ходом;
- складність виконання норм якості напруги для силових та технологічних споживачів одночасно.

Споживання електроенергії на підстанціях феросплавних виробництв складає близько 20% від загального обсягу споживання в Дніпропетровській області. Проектна потужність підприємства складає 1000 МВт. Маючи у своєму складі технологічні установки великої потужності, для підприємства відкриваються унікальні можливості участі на ринку допоміжних послуг в якості споживача-регулятора енергосистеми. Для цього необхідна реконструкція системи моніторингу та керування електроспоживанням для управління навантаженням з регіонального диспетчерського центру НЕК Укренерго. Вирівнювання графіку електричних навантажень виконується з урахуванням власної генерації від сонячних електростанцій (СЕС) та інших джерел, керуючись ціною електричної енергії. Таким чином, управління режимами електроспоживання феросплавними виробництвами дозволяє одночасно реалізувати технологічні процеси виробництва феросплавів та забезпечити запас статичної та динамічної стійкості енергосистеми під час воєнного стану.

Дослідження електричних режимів та рівнів електромагнітної сумісності виконано в умовах діючого виробництва з урахуванням різноманітних аварійних та нештатних ситуацій, спричинених військовою агресією росії.

Основна частина. Як відомо, економічний збиток, пов'язаний з низькою якістю електроенергії, має реактивну складову [1, 2]. Реактивна складова визначається збільшенням втрат активної потужності і скороченням терміну служби ізоляції електрообладнання. Наприклад, вартість некомпенсованої реактивної потужності на одному потужному підприємстві за червень місяць 2023 року складає майже 3 млн.грн. Значення відносних втрат електроенергії в електричних мережах промислово розвинених країн за усередненими даними за 2018–2024 рр. знаходяться в межах 4–7%. Так, в Німеччині – 4%, у Франції – 7, в Австрії, Бельгії, Чехії – 5, США – 6, Італії, Швейцарії та Японії – 7% . Ці країни мають високе значення внутрішнього валового продукту (ВВП) за паритету купівельної спроможності (ПКС) на душу населення, що перевищує 20 тис.дол.: США – 54,5 тис.дол, Австрія і Німеччина – 46,5, Італія –

35,4, Франція – 40,7 тис.дол. Це дозволяє виділити зв'язок між відносними втратами електроенергії та рівнем життя населення в певній країні.

Високий рівень втрат в електричних мережах пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності, фізичним і моральним зносом мережі, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і регулювання напруги і проблемою якості електричної енергії [3].

Низький рівень якості електричної енергії призводить до зниження енергетичної ефективності електричних мереж за рахунок збільшення втрат активної та реактивної потужностей, технологічних витрат електроенергії на її транспорт, до зниження терміну служби електрообладнання, збільшення капітальних вкладень в електричні мережі, порушення умов нормального функціонування енергетичної системи. Тому при реконструкції діючої основної схеми та системи власних потреб виробництва феросплавів необхідно проводити з урахуванням рівнів електромагнітної сумісності. Системи електропостачання власних потреб підприємства побудовані за радіальною схемою живлення з ізольованою нейтраллю. Враховуючи категорійність та вимоги до надійності та якості електропостачання, дистанції кабельних ліній досягають значень 200–210 км. При цьому коефіцієнт потужності електродугових печей складає $\cos\phi=0,6-0,7$ що вимагає розробки рішень для компенсації реактивної потужності (рис. 1).

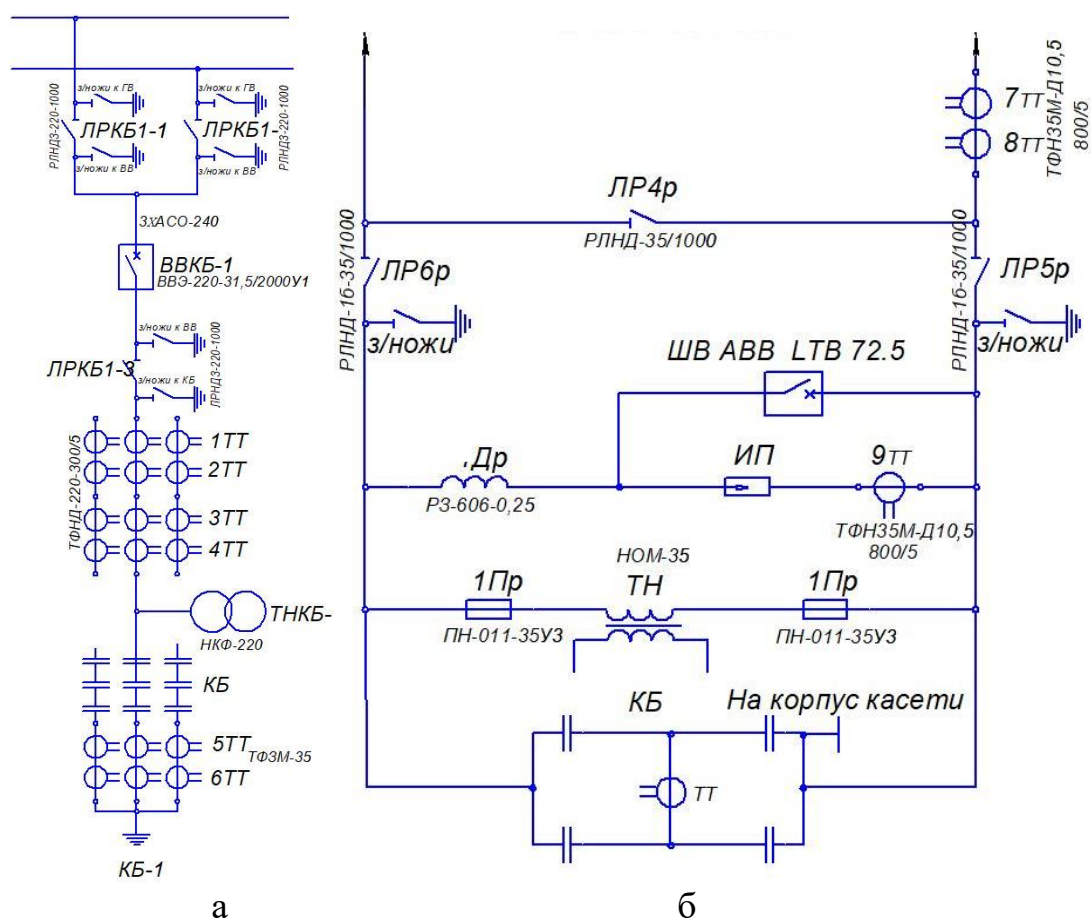


Рис. 1. Електрична схема приєднання комірки конденсаторної батареї (а) та однолінійна схема пічної УПК (б)

Для оцінки якості електроенергії в умовах об'єднаної енергосистеми з Європейським союзом важливо враховувати відповідні стандарти ЄС, зокрема, EN 50160 та стандарти з електромагнітної сумісності (ЕМС) серії EN 61000. Стандарт EN 50160 визначає ключові параметри стійкості електропостачання, тоді як стандарти ЕМС серії EN 61000 встановлюють граничні значення паразитного випромінювання, стійкість до перешкод, а також процедури тестувань та вимірювань. Застосування цих нормативних документів важливо для забезпечення високої якості електроенергії.

Джерело живлення

EN 50160 Характеристики напруги електроенергії, що подається від загальних електричних систем.

Граничні значення для пристроїв споживання

- EN 61000-3-2 Гармонічний струм ($I < 16$ А в одній фазі);
- EN 61000-3-12 Гармонічний струм ($I > 16$ А і < 75 А в одній фазі);
- EN 61000-3-3 Зміни напруги, коливання напруги і флікер ($I < 16$ А);
- EN 61000-3-11 Зміни напруги, коливання напруги і флікер ($I > 16$ А і < 75 А в одній фазі).

Контрольно-вимірювальні процеси

- EN 61000-4-7 Методи вимірювань гармонік;
- EN 61000-4-15 Флікерметр. Функціональні і конструктивні вимоги;
- EN 61000-4-30 Методи вимірювань показників якості електричної енергії.

Стандарт EN 50160 визначає "електричну енергію" як продукт, що базується на обраних характеристиках якості напруги. Кожен споживач в Європі допускає, що якість напруги у системах громадського електропостачання з низькою та середньою напругою буде визначатися в зазначених межах. За нормальних умов застосування стандарту EN 50160 розповсюджується на точку підключення мережі загального користування до споживача, а також на точку підключення до неї приватного енерговиробничого обладнання. Моніторинг цих характеристик у точці підключення до мережі і всередині самої мережі є важливою складовою управління електропостачальними компаніями та операторами промислових електромереж.

Основні параметри якості електричної енергії, розглянуті у даній роботі:

- **номінальна напруга (U)** – стандартне значення напруги в електричній системі;
- **зміна напруги (Voltage Variation)** – допустимі відхилення напруги від номінального значення.

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де U_y – усереднене значення напруги в кВ у інтервалі часу -1 хв.,
 $U_{ном}$ – номінальна напруга.

$$U_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N U_i^2 / N}$$

де U_i – значення напруги в i -тому спостереженні (кВ); N – число спостережень (за 1 хв. повинно бути не менше 18).

За нормами ГОСТ 13109-97 допустимі значення відхилень напруги на виводах електроприймачів протягом доби вимірювань знаходяться в межах $\pm 10\%$ від $U_{ном}$, (аварійне значення) при цьому 95% часу відхилення напруги повинні знаходитися в межах $\pm 5\%$ від $U_{ном}$ (допустимі значення).

– **гармонічні спектри (Harmonic Distortion)** – наявність в електричній системі гармонік (множинні частоти номінальної частоти), які можуть впливати на роботу обладнання, характеризуються коефіцієнтом викривлення синусоїдальності напруги (%);

Основну частоту $x(t)$ з періодом T можна представити виразом:

$$x(t) = \sum_{m=1}^n A_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T} m + \varphi_m\right), \quad (2)$$

де A_m – амплітуда m -ної гармоніки, φ_m – фазний кут m -ної гармоніки, m – порядковий номер гармоніки, n – кількість гармонік; K_U – коефіцієнтом n -ї гармонічної складової напруги $K_{U(n)}\%$, що визначається за виразами:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100 \quad \text{і} \quad K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2} \cdot \frac{100}{U_{ном}},$$

де U_n – діюче значення напруги n -ї гармоніки (кВ).

Гранично допустиме значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової напруги обчислюють за формулою $K_{U(n)гран} = 1,5 K_{(n)норм}$.

де $K_{U(n)норм}$ – нормальне допустиме значення коефіцієнта n -ої гармонічної складової.

– **фазовий зсув (Phase Shift)** відхилення фази вихідної напруги або струму від фази вхідної напруги або струму.

– **інтергармоніки (interharmonics)**: це гармонічні коливання з частотою не кратною частоті мережі живлення. В амплітудно-частотному спектрі вони знаходяться між канонічними гармоніками або канонічними та неканонічними.

Комплексний вузол промислового навантаження складається з нестаціонарного навантаження від дугових феросплавних печей та джерел розподіленої генерації від СЕС, потужністю 240 МВт. Електродугові печі є потужним джерелом вищих гармонік та інтергармонік широкого спектру зі стохастичним характером часової еволюції [4–6].

Результатами комплексного моніторингу було виявлено, що основним «маркером» роботи великих сонячних станцій в системах електропостачання є K -фактор. Це параметр, що характеризує наявність вищих гармонік струму у частотному спектрі нелінійного навантаження [7–10].

K -фактор визначається залежністю:

(3)

де h – номер гармоніки струму, i_h – середньоквадратичне значення струму гармоніки за номером h .

У частотному діапазоні дослідження проводились до гармоніки номер 50 включно для виявлення потенційно можливих резонансних (можливості аналізатора якості електроенергії Metrel Mi2892. Метод розрахунку експериментальних значень K -фактору прийнято зі стандарту IEEE-Standard 1100-1992 [8]:

$$K'_{fact} = \frac{\sum_{i=1}^n i^2 RMS_i^2}{\sum_{i=1}^n RMS_i^2}, \quad (4)$$

де i – номер гармоніки струму (емпіричне значення); n – кількість гармонічних складових; RMS_i – середньоквадратичне значення гармоніки з номером i .

$$RMS_i = \sqrt{Real_i^2 + Imag_i^2} = \sqrt{Power_i^2} \quad (5)$$

де $Real_i$ – активна потужність гармоніки за номером i ; $Imag_i$ – реактивна потужність гармоніки за номером i .

На рис. 2 представлена крива мережевого струму інвертора $\omega_m = 2n \cdot 30c'^1$. Амплітудний спектр мережевого струму відображено на рис. 3. При цьому характерно виражені гармоніки у діапазоні 150–350 Гц. Гармоніки 5 і 7-го порядків являють собою суперпозицію відповідних канонічних гармонік і гармонік, що утворюються в результаті модуляції кривої мережевого струму.

Спектральний склад первинного струму сонячного інвертора містить канонічні гармоніки та інтергармоніки інвертора [6–7]:

$$i(t) = \frac{-3 \cdot \sqrt{3}}{\pi^2} u_{lm} \times \left[\sum_{s=-n}^n \left[\sum_{q=-n}^n \frac{(-I)^s (-I)^q}{(6q+1)(6s+1)Z_{(s)}} \left[\sin \left[(6q+6s+2)\omega_m t - \omega_l t - \frac{2\pi}{3} + \varphi(s) \right] + \sin \left[(6q+6s)\omega_m t + \omega_l t - \frac{2\pi}{3} + \varphi(s) \right] \right] \right] \right], \quad (6)$$

де ω_l частота мережі, ω_m частота на виході інвертора.

(7)

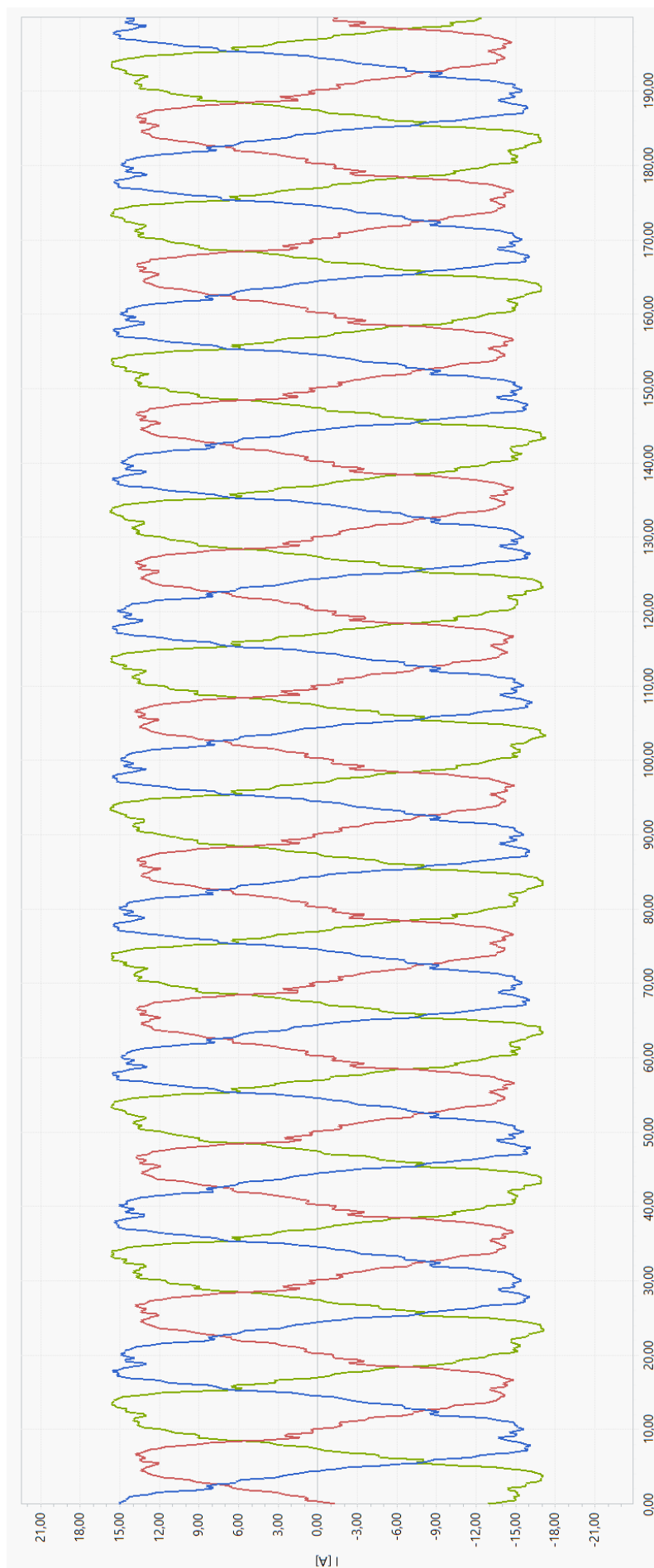


Рис. 2. Часова залежність мережевого струму сонячного інвертора

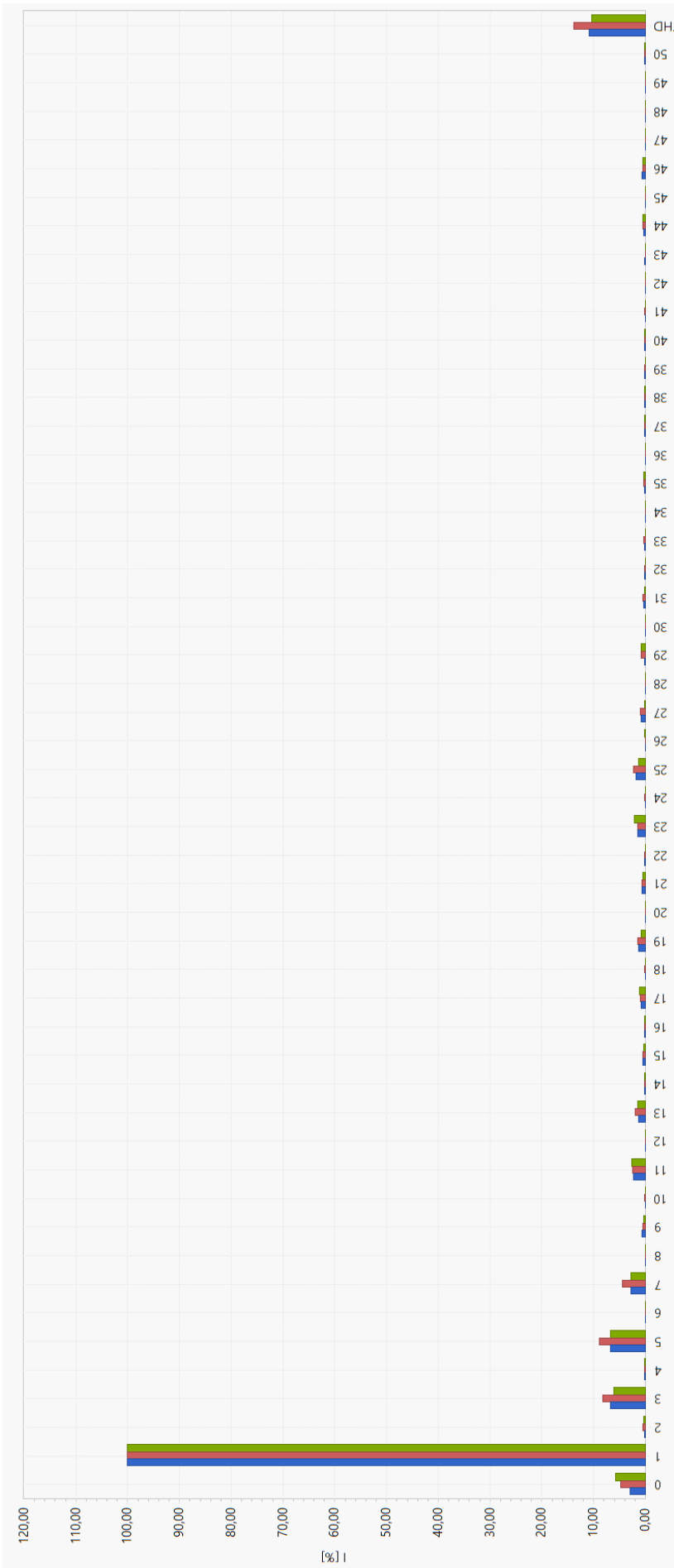


Рис. 3. Спектральный состав сетевого тока солнечных инверторов

Результати моделювання спектрального складу сонячних інверторів у припущенні синусоїдального характеру моделюючої функції представлені на рис.4.

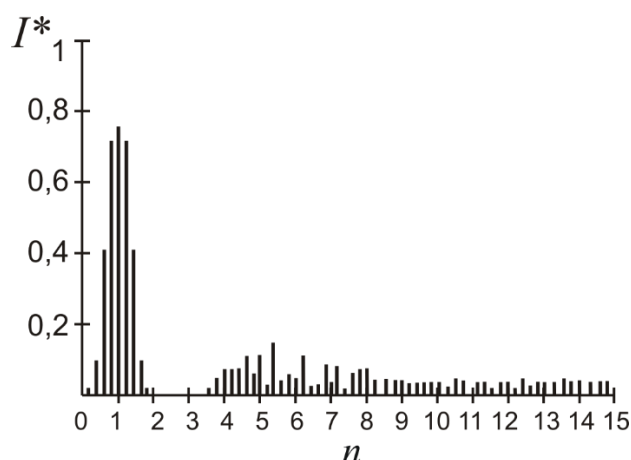


Рис. 4. Результати моделювання спектрального складу первинного струму інверторів СЕС

При впровадженні принципів децентралізації енергетики та масовому приєднанні сонячних та вітрових електростанцій у вузли промислового навантаження характер амплітудно-частотних характеристик суттєво змінюється. При наявності потужних пристроїв компенсації реактивної потужності виникають умови резонансу напруги на одній або кількох частотах (рис. 5–7). Прогнозування та передбачення цих небезпечних явищ досить складна задача, враховуючи особливості одночасної роботи промислового нестационарного обладнання, пристроїв компенсації та інверторів джерел розподіленої генерації у єдиному електромагнітному середовищі [6, 9].

Для визначення зони імовірних резонансних частот при переході енергосистеми до аварійних схем живлення допустимо використовувати спрощені залежності для розрахунку номеру резонуючої гармоніки у схемах живлення пічних трансформаторів:

$$n = \sqrt{\frac{S_{mp}}{u_{кз} Q_{кб}}}, \quad (8)$$

де S_{mp} – потужність трансформатора; $u_{кз}$ – напруга короткого замкнення трансформатора; $Q_{кб}$ – реактивна потужність батареї.

Спрощена залежність для КБ без фільтруючих реакторів:

$$n = \sqrt{\frac{S_{кз}}{Q_{кб}}}. \quad (9)$$

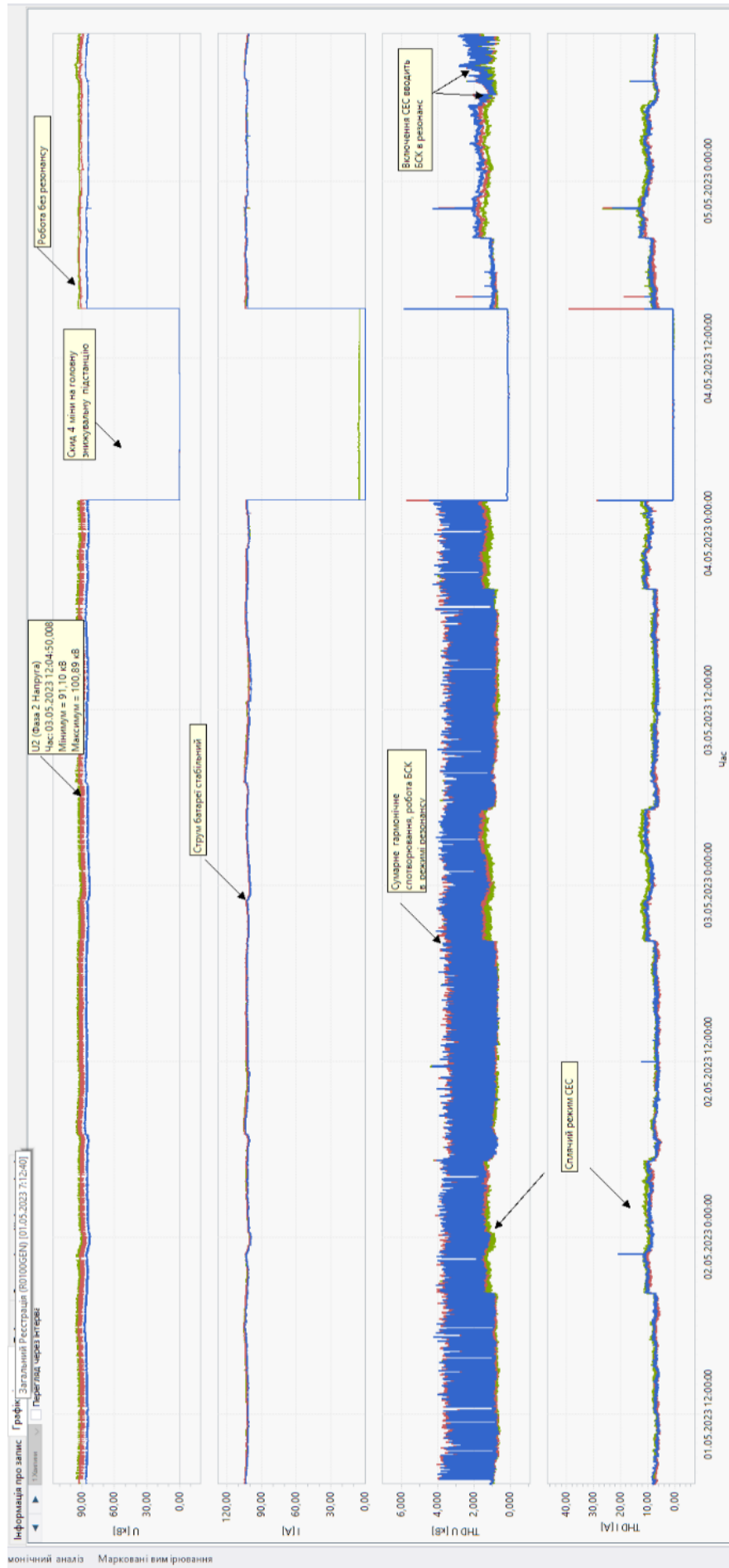


Рис. 5. Рівні електромагнітних завод (ТНД) при резонансних режимах, викликаних сумісною роботою інверторів сонячних електростанцій та промисловими КБ

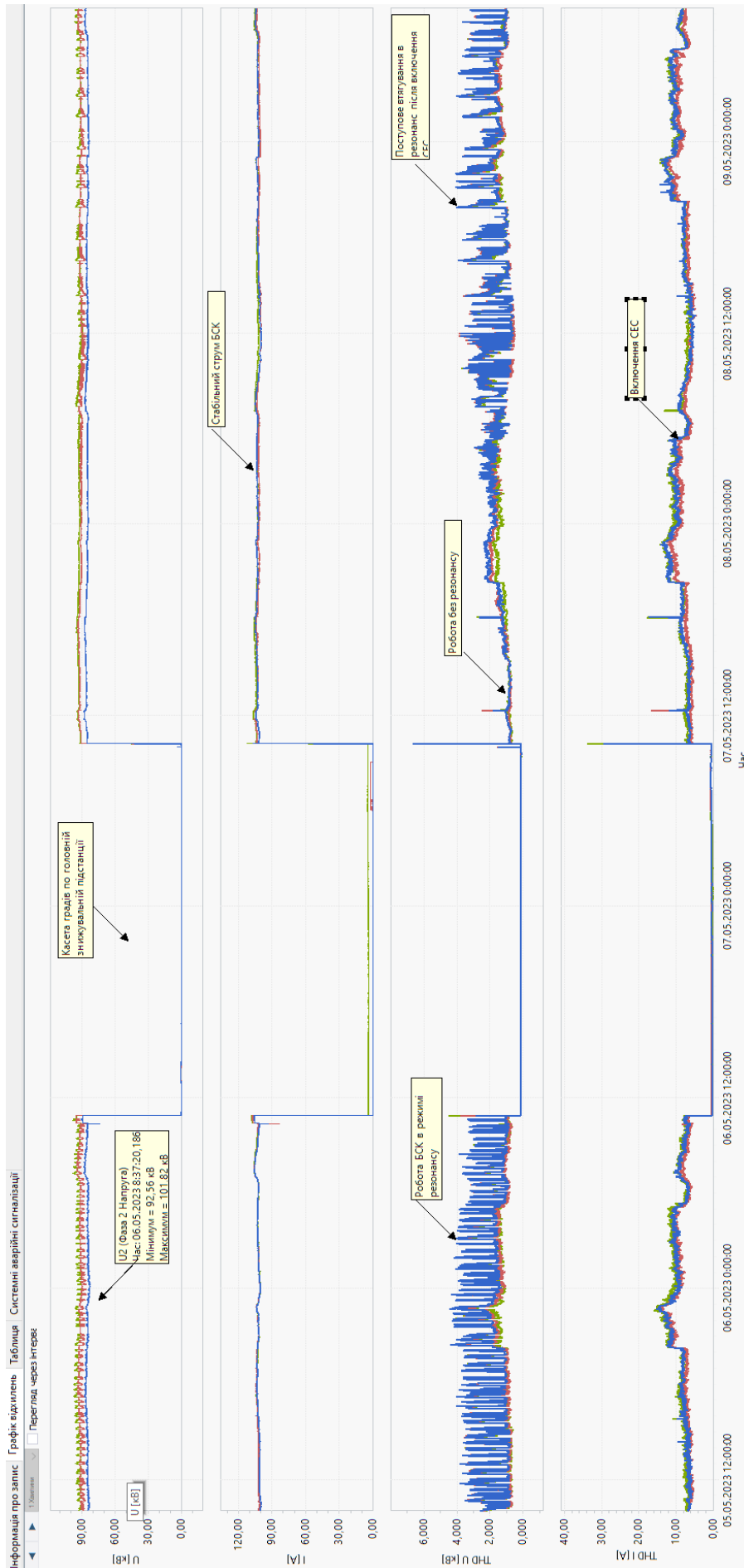


Рис. 6. Експериментальні дослідження зони резонансних частот при почерговому приєднанні ступеней КБ

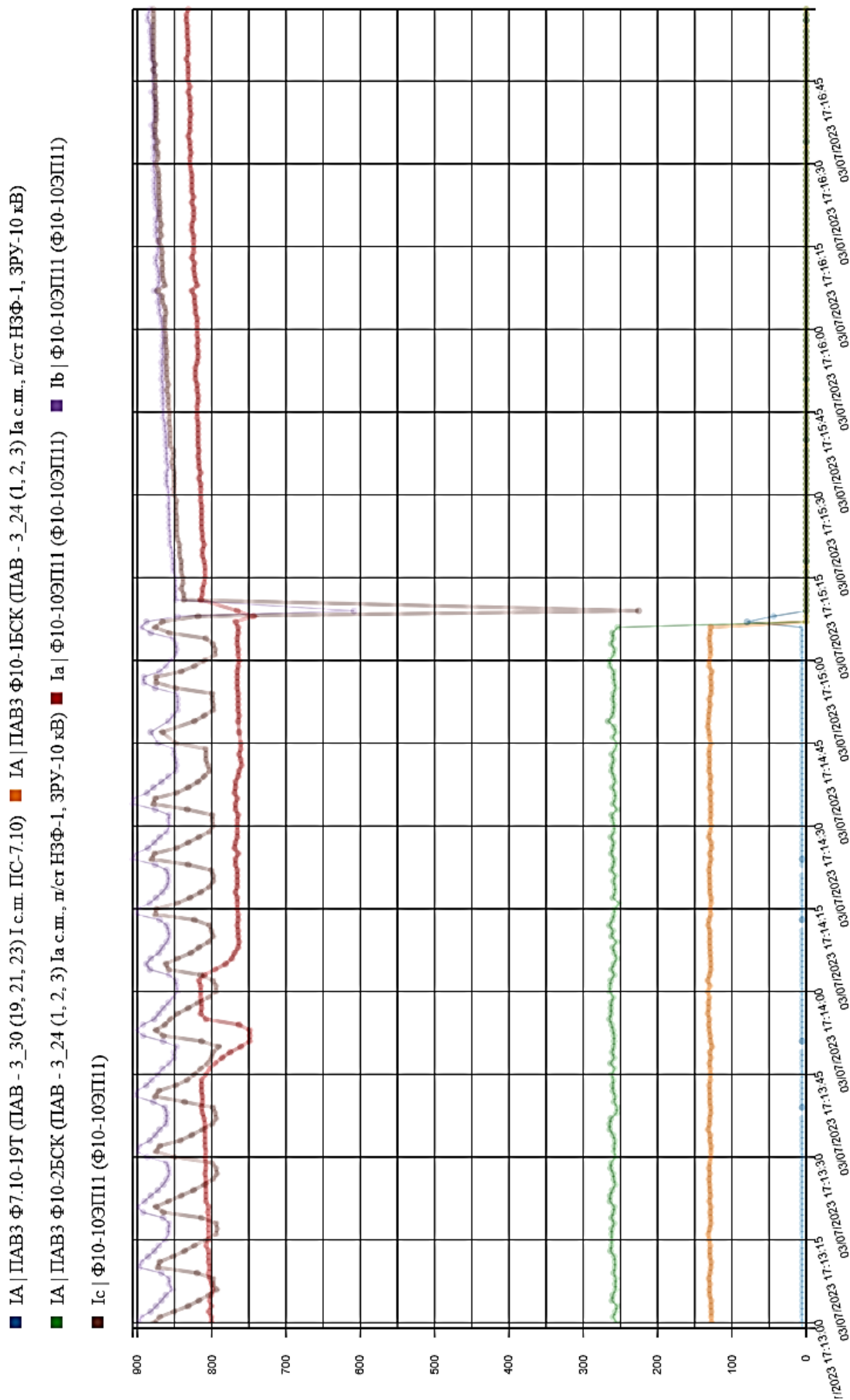


Рис. 7. Характер аварійного перехідного процесу при короткому замиканні у віддаленій частині системи електропостачання з приєднаною КБ

Даний підхід дозволяє оцінювати рівні електромагнітної сумісності енергоємного промислового обладнання у складних умовах технологічних обмежень енергосистеми та визначати допустимість застосування некерованих пристроїв компенсації реактивної потужності.

Висновки. Встановлено, що графіки зміни показників несинусоїдальності струмів та напруги феросплавних виробництв мають свій особливий характер. У поєднанні з джерелами розподіленої генерації це дозволяє визначати зони домінування вищих гармонік та інтергармонік, в залежності від параметрів і стану мережі живлення, що підтверджується результатами експериментального моніторингу. Для умов системи електропостачання металургійного підприємства отримано закономірності, що пов'язують параметри резонансних процесів у комплексних вузлах навантаження з розподіленою генерацією і відрізняються від існуючих можливістю прогнозувати ділянки амплітудно-частотних характеристик з резонансними явищами при паралельній роботі з енергосистемою обмеженою потужністю.

Перелік посилань

1. Shidlovskii, A.K., Zharkin, A.F., Pavlov, V.B., & Novskiy, V.A. (2018). Influence of development of charging infrastructure for electric vehicles and hybrid transport on modes of electric networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*, (3), 74–81. <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.074>
2. Pivnyak G.G., Zhezhelenko I.V., Papaika Yu.A., & Lysenko O.H. (2017). Interharmonics in power supply systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 109–114.
3. IEEE 1547:2003-Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System.
4. Pivnyak G., Zhezhelenko I., & Papaika Yu. (2013). Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems – Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency*, 11–18, <https://doi.org/10.1201/b16355-3>
5. Papaika, Yu.A., Lysenko, O.H., Koshelenko, Ye.V., & Olishevskiy, I.H. (2021). Mathematical modeling of power supply reliability at low voltage quality. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 97–103. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/097>
6. Pivnyak, G., Azukovskiy, O., Papaika, Yu., Careres Cabana, E., Olczak, P., & Dyczko, A. (2021). Assessment of power supply energy efficiency by voltage quality criterion. *Rynek Energii*, 155(4), 75–84.
7. Pivnyak, G., Aziukovskyi, O., Papaika, Y., Edgar Caseres Cabana, Miedziński, B., Polnik, B., Jamróz, A., & Polyanska, A. (2024). Managing the power supply energy efficiency by means of higher harmonics. *Polityka Energetyczna*, 27(4), 59–80. <https://doi.org/10.33223/epj/191813>
8. Kyrylenko, O., Stogniy, B., Denysiuk, S., & Sopel, M. (2024) Smart-monitoring of electric power systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, (5), 48–62. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048.4>
9. Dusza, D., & Kosobudzki, G. (2018). Reactive Power Measurements Based on its Geometrical Interpretation. *2018 14th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/wzee.2018.8749118>
10. Zharkin, A.F., Palachov, S.O., Pazieiev, A.G., & Malakhatka, D.O. (2024). Assessment of the impact of bidirectional semiconductor converter on the quality indicators of electric supply in the Microgrid. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2024(4), 73–79. <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.073>

ABSTRACT

Purpose. To investigate the levels of non-sinusoidality and voltage asymmetry in the power supply system of the ferroalloy plant, provided that reactive power is compensated and distributed generation from solar power plants is available.

The methods. The analysis of electromagnetic interference levels was performed based on data from experimental monitoring of voltage quality indicators by multi-channel recorders combined into SCADA. Modeling was performed using spectral analysis and fast Fourier transform methods. Electromagnetic phenomena of interference attenuation in electrical networks were modeled by schemes for replacing electrical network elements, taking into account the surface effect of the flow of higher harmonic currents.

Findings. The results of an experimental study of electrical energy parameters under conditions of nonlinear and asymmetric loads of an industrial enterprise were obtained. Connecting capacitor banks (CB) to the load node with decentralized energy sources (solar power plants) significantly changes the nature of the amplitude-frequency characteristics and leads to resonance phenomena. Simulation modeling methods have revealed the zones of occurrence of resonant frequencies when the power system is limited.

The originality. The dependences of the voltage non-sinusoidality indicators on the parameters of the enterprise's power supply system have been established. This allows us to determine the critical zones of occurrence of resonant frequencies and create conditions for preventing operational over-voltage's during the operation of furnace equipment.

Practical implementation. The obtained data for calculating the parameters of the equivalent circuit of the power supply system allow us to determine changes in the conditions for the occurrence of voltage resonances during damage to the transmission system and system limitations of load power due to military operations and emergency situations.

Keywords: *electromagnetic compatibility, quality of electric energy, reactive power, electromagnetic footprint, nonlinear and asymmetric loads.*