

Дніпродзержинський державний технічний університет

ІМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АГРЕГАТУ «ПІЧ-КІВШ» ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

Вступ. Аналіз робіт щодо використання статистичних характеристик нестационарних режимів електротермічних установок показує, що для реалізації керування в ході плавлення за статистичними критеріями у реальному масштабі часу до останніх років не було суттєвих передумов через обмеження можливостей за швидкістю і обсягами вимірювань параметрів релейно-контакторною автоматикою.

Перехід до створення систем автоматичного керування (САК) з ЕОМ відкрив широкі перспективи для подальшого розвитку і впровадження у практику статистичних показників, що у значній мірі підвищує ефективність використання електропічних агрегатів і робить більш оправданим використання самої обчислювальної техніки з точки зору наданих нею можливостей контролю і управління значно великим числом параметрів і, відповідно, більш успішної оптимізації і адаптації управляючих алгоритмів.

Значне місце в цих алгоритмах повинно бути приділено насамперед тим питанням, без яких саме управління за статистичними характеристиками може бути малоефективним. Це питання визначення законів розподілу, що застосовуються при формуванні статистичних показників управління, випадкових коливань, наприклад, струму, а також питання перевірки стаціонарності процесу на інформативних ділянках вибірок.

Використання статистичних критеріїв поза рядом інформаційних показників технологічного процесу пояснюється простими міркуваннями: зміна будь-якого з параметрів чи групи параметрів визиває зміну більшості електричних і технологічних параметрів установок. Іншими словами, імовірнісна природа поведінки дугової електротермічної установки вимагає відповідно і стохастичного управління, яке здійснюється САК з ЕОМ.

У якості об'єкта дослідження взято підстанцію ФКУ-35 металургійного комбінату, що живить напругою 35 кВ агрегат «піч-ківш» (ПК) конвертерного цеху, де встановлено статичні тиристорні компенсатори з керованими реакторами типу TCR; керування здійснюється тиристорними ключами за рахунок зміни кута відкриття вентилів. Подавлення вищих гармонік виконують силові резонансні фільтри 3-ї та 5-ї гармонік. Повна характеристика підстанції наведена в [5].

Постановка задачі. Метою досліджень, котрі проводились за період з березня по серпень 2014 р., є визначення статистичних характеристик агрегату «піч-ківш» у режимі нормальної експлуатації. У якості параметрів обрані: струм навантаження агрегату ПК, лінійні напруги на шинах 35 кВ і струми фільтрів 3-ї та 5-ї гармонік.

Вихідні експериментальні параметри. У табл.1 наведено матрицю A1 вихідних даних, зареєстрованих за період дослідження.

У стовпчиках указано:

- 1 - 3 – струми навантажень фаз керованого реактора, A;
- 4 - 6 – лінійні напруги, відповідно U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} ;
- 7 – струм I_{Δ} фільтра 3-ї гармоніки;
- 8 – струм I_{Δ} фільтра 5-ї гармоніки.

Таблиця 1 – Вибірка із загального масиву експериментальних даних за період вимірювань

№	1	2	3	4	5	6	7	8
1	276	279	281	35.15	35.35	35.0	326	150
2	276	280	281	35.25	35.5	35.3	328	151
3	275	272	284	35.35	35.55	35.3	327	151
.....
350	271	273	277	35.1	35.3	35.1	321	148
351	270	274	278	35.05	35.2	35.1	320	149
352	273	275	281	35.2	35.4	35.15	323	149

Матриця А1 вихідних даних була перегрупована: масив значень за 352 доби згруповано по «чотири», у результаті чого отримано 88 середньодобових блоків параметрів, що досліджувались. Результати розрахунків наведено в табл.2 (матриця А).

Таблиця 2 – Вибірка із масиву середньодобових параметрів

№	1	2	3	4	5	6	7	8
1	275.75	277	281.75	35.263	35.475	35.225	327	150.75
2	207.5	209.5	207.75	35.163	35.338	35.15	326.5	151
3	277.5	282	284.5	35.475	35.575	35.338	328.5	151
.....
86	270.75	275.5	276.5	35.012	35.13	35.038	322.2	148.75
87	271.75	276	279	35.075	35.212	35.075	322.5	149
88	270.25	273	277.5	34.925	35.125	34.988	320.5	149.25

Примітка: нумерація стовпців відповідає позначенням табл.1.

За результатами первинної обробки даних отримано статистичні значення параметрів. Математичні очікування усіх змінних (згідно з нумерацією стовпців), А:

$$M=(260.216 \ 263.957 \ 267.185 \ 35.283 \ 35.427 \ 35.298 \ 325.875 \ 150.188).$$

Середнє квадратичне відхилення усіх змінних, А:

$$\sigma=(26.125 \ 26.187 \ 25.842 \ 0.23 \ 0.239 \ 0.233 \ 3.87 \ 1.394).$$

Більш поглиблений аналіз статистичної інформації передбачає розрахунок значень коефіцієнтів несиметрії струмів і напруг з послідовним визначенням законів розподілу цих величин.

Результати роботи. Несиметричні режими електричного навантаження найбільше проявляються при роботі дугових сталеплавильних печей. У відповідності до діючих правил побудови електроустановок ці мережі працюють з ізольованою нейтраллю. При роботі печей унаслідок коливань електричного навантаження діючі значення струмів у будь-який момент часу утворюють несиметричну систему. Несиметрія струмів посилюється різницею уставок регуляторів струму.

Несиметрична трифазна система струмів $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ може бути розкладена на симетричні складові струмів прямої, зворотної і нульової послідовності: $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$.

Несиметрія трифазних струмів характеризується коефіцієнтом несиметрії, що визначається як відношення модуля складової зворотної послідовності до модуля складової прямої послідовності:

$$a = I_2 / I_1. \quad (1)$$

У теперішній час практично усі електротермічні установки будуються з непровідною подиною і працюють без нульового проводу. Таким чином первинні та вторинні кола агрегату ПК є також трипровідними без нульового проводу, а нульова складова у вказаних мережах відсутня ($I_0=0$). Тому можна записати:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C); \\ I_2 &= \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – фазовий оператор.

Для вводу і обробки даних на цифрових ЕОМ безперервні процеси зміни струмів надавалися у вигляді дискретних послідовностей синхронних «трійок» ординат з обсягом вибірки

$$n = T / \Delta t_K,$$

де T – тривалість реалізації; Δt_K – крок дискретизації (квантування).

При аналізі несиметричних режимів коефіцієнт несиметрії струмів a доцільно розраховувати безпосередньо через модулі (діюче значення) струмів фаз I_A , I_B і I_C , які в умовах експлуатації можуть бути виміряні за допомогою спеціального фіксуючого пристрою або визначені за синхронним записом діючих значень струмів на багатоканальному самописному пристрої. У нашому випадку вимірювання виконувались електронно-цифровою системою реєстрації даних.

Формула для визначення коефіцієнта несиметрії через діюче значення струмів має вигляд [3]:

$$a = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - 4F\sqrt{3}}}{\sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + 4F\sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - 4F\sqrt{3p(p-I_A)(p-I_B)(p-I_C)}}{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + 4F\sqrt{3p(p-I_A)(p-I_B)(p-I_C)}}}, \quad (3)$$

де $F = \sqrt{p(p-I_A)(p-I_B)(p-I_C)}$; $p = (I_A + I_B + I_C)/2$.

Коливання струмів окремих фаз є процесами випадковими, тому коефіцієнт несиметрії струмів змінюється у часі також випадковим чином і вимагає для аналізу використання статистичних методів. Алгоритм за виразом (3) використано при статистичному аналізі несиметричних режимів струмів ряду електротермічних установок.

Коефіцієнт несиметрії струму розраховується щодобово. Значення коефіцієнта несиметрії струму у відсотках, розраховані за формулою (3), наведено нижче за інтервалами розбиття:

$\alpha_1^{\%}$	1	2	3	4	.....	85	86	87	88
	1.318	0.605	1.454	1.74	.....	1.293	1.525	0.821	1.547

Математичне очікування коефіцієнта несиметрії (%)

$$M_{\sigma 1} = 1,738.$$

Середнє квадратичне відхилення коефіцієнта несиметрії струму (%)

$$\sigma_{\sigma 1} = 1,019.$$

Для визначення закону розподілу випадкової величини коефіцієнта несиметрії струмів побудовано гістограму розподілу коефіцієнта несиметрії струмів і виконано розрахунок функції щільності розподілу.

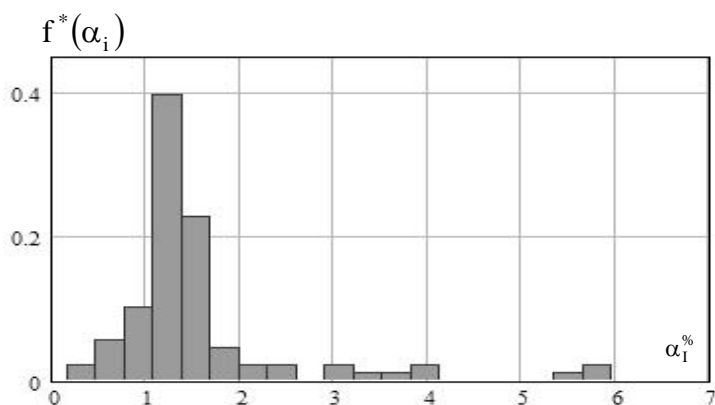


Рисунок 1 – Статистична функція щільності коефіцієнта несиметрії струмів

де $z = \lg \alpha_i$.

Визначивши параметри методом найменших квадратів, отримаємо $M_z = 0,255\%$ і $\sigma_z = 0,071\%$, тоді функція розподілу запишеться як

$$f(\alpha_i) = \frac{A}{\alpha_i \cdot 0,071 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(z-0,255)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (5)$$

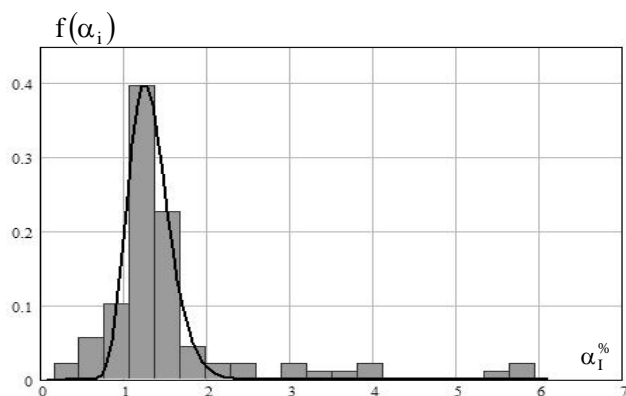


Рисунок 2 – Статистична функція щільності коефіцієнта несиметрії струмів, апроксимована логарифмічно нормальним розподілом

Аналізуючи характер технологічного процесу агрегату «під-ківш» можна припустити, що найбільш доцільно використовувати для математичного опису (з урахуванням виду гістограми, рис.1) логарифмічно нормальний розподіл.

Функція щільності двопараметричного логарифмічно нормального розподілу має вигляд:

$$f(\alpha_i) = \frac{A}{\alpha_i \cdot \sigma_z \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(z-M_z)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (4)$$

Результати апроксимації статистичної функції щільності наведено на рис.2.

Випадковий процес зміни коефіцієнта несиметрії струмів за період вимірювання наведено нижче (рис.3).

Дослідження питання щодо наявності стохастичного зв'язку з іншими електричними параметрами буде виконано далі.

Несиметрія напруг при роботі агрегату «під-ківш». У трипровідній мережі 35 кВ з ізолюваною нейтраллю напруга нульової послідовності

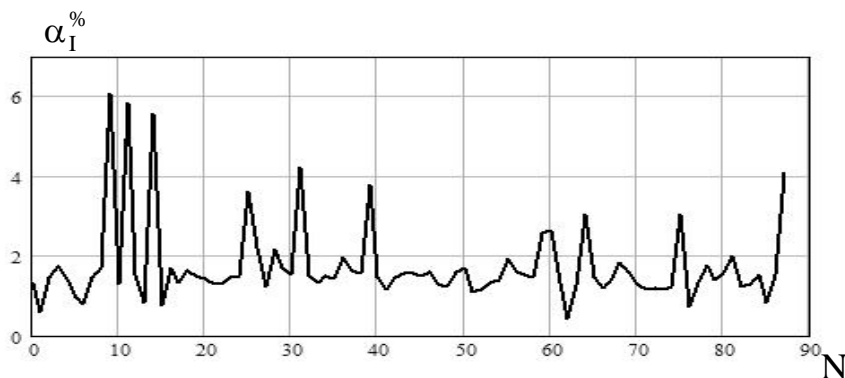


Рисунок 3 – Графік зміни коефіцієнта несиметрії струмів за період дослідження

відсутня, і вектори фазних напруг утворюють у комплексній площині замкнений трикутник (рис.4).

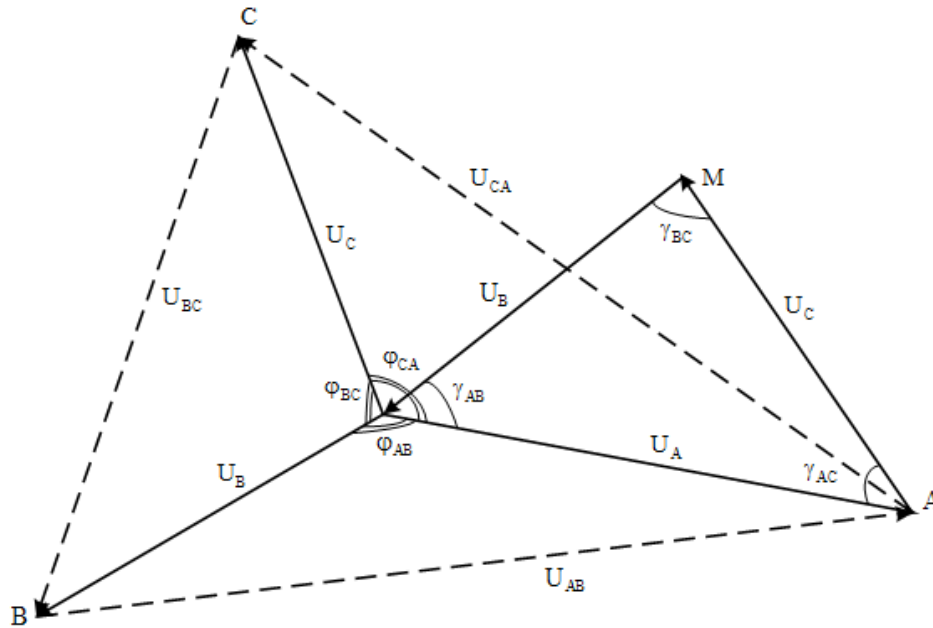


Рисунок 4 – Векторна діаграма фазних і лінійних напруг в мережах з ізольованою нейтраллю

Застосувавши методику, викладену раніше до трикутника лінійних напруг ABC , для модуля напруги зворотної послідовності отримаємо вираз

$$U_2 = |\underline{U}_2| = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - 4F_l \sqrt{3}}{2}}, \quad (6)$$

де U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – модулі лінійних напруг; F_l – площа трикутника ABC , утвореного векторами лінійних напруг:

$$F_l = \sqrt{p_l (p_l - U_{AB})(p_l - U_{BC})(p_l - U_{CA})},$$

де $p_l = (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})/2$ – півпериметр трикутника ABC .

Несиметрія трифазної системи напруг, як і несиметрія струмів, у загальному випадку характеризується відношенням модуля складової напруги зворотної послідовності до модуля складової напруги прямої послідовності:

$$\alpha_U = |\underline{U}_2|/|\underline{U}_1| = U_2/U_1. \quad (7)$$

Розрахунки показують, що симетрична складова прямої послідовності U_1 мало чим відрізняється від значення номінальної напруги $U_{ном}$. Тому згідно з ГОСТ 13109-97 несиметрія трифазної системи напруг характеризується напругою зворотної послідовності основної частоти, що відноситься до номінальної напруги, у відсотках:

$$\alpha_U = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{U_{AB,\%}^2 + U_{BC,\%}^2 + U_{CA,\%}^2 - 4F_{l,\%} \sqrt{3}}{2}}, \quad (8)$$

де $U_{AB,\%}$, $U_{BC,\%}$, $U_{CA,\%}$, $F_{l,\%}$ – величини, що відносяться до номінальної напруги, %.

В подальшому будемо називати величину α_U коефіцієнтом несиметрії. Коефіцієнт несиметрії лінійних напруг при роботі агрегату ПК може змінюватись в діапазоні від 0 до деякого граничного значення. Згідно з ГОСТ 13109-97 напруга зворотної послідовності не повинна перевищувати 2% номінальної напруги на виводах будь-якого симетричного трифазного приймача електроенергії. Тому, якщо в точці підключення агрегату ПК до мережі $\alpha_{U_{гран}} \leq 2\%$, то з точки зору несиметрії вона практично не впливає на інших споживачів, що працюють паралельно з нею.

Для ілюстрації використання основних положень, викладених вище, наводимо приклад розрахунку несиметричного режиму лінійних напруг на шинах підстанції 35 кВ, що живить одиничний агрегат ПК з трансформатором потужністю 40 МВ·А і номінальним первинним струмом 660 А. Опір x_c від джерела живлення до збірних шин 35 кВ складає 1,65 Ом. Згідно з робочими характеристиками агрегату струм експлуатаційного КЗ $I_{e.к.з} = 1,56I_{ном} = 1030$ А.

У якості вихідних даних використано вибірку випадкових незалежних значень лінійних напруг на шинах 35 кВ агрегату ПК, знятих синхронно по три.

Коефіцієнт несиметрії лінійних напруг обчислювався щодобово на основі матриці А (табл.2) за формулою (3), результати обчислень з розбиттям по інтервалам наведено нижче:

$$\alpha_U^{\%} =$$

1	2	3	4	.....	85	86	87	88
0.0025	0.016	0.019	0.0014		0.022	0.017	0.028	0.023

Математичне очікування коефіцієнта несиметрії напруг

$$M_{\sigma_U}^{\%} = 0,024.$$

Середнє квадратичне відхилення коефіцієнта несиметрії напруг (%)

$$\sigma_{\sigma_U}^{\%} = 9,126 \times 10^{-3}.$$

Для визначення закону розподілу випадкової величини коефіцієнта несиметрії напруг побудовано гістограму розподілу коефіцієнта несиметрії напруг і виконано розрахунок функції щільності розподілу (рис.5).

Вид гістограми розподілу коефіцієнта несиметрії напруг і деякі фізичні міркування дозволяють зробити припущення щодо можливості використання для апроксимації нормального розподілу, який запишеться у вигляді

$$f(\alpha_U) = \frac{A}{\sigma_U \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\alpha_U - \bar{\alpha}_U)^2}{2\sigma_U^2}}, \quad (9)$$

де $\bar{\alpha}_U$ – математичне очікування коефіцієнта несиметрії напруг; σ_U – середнє квадратичне відхилення коефіцієнта несиметрії напруг. Відповідну гістограму зображено на рис.6.

Представляє інтерес також характер випадкового процесу зміни коефіцієнта несиметрії напруг (рис.7).

Аналіз отриманих результатів. При дослідженні режимів несиметрії струмового навантаження установки «під-ківш» ставилася одночасно задача виявлення законів розподілу значень α_1 . Встановлено, що для ділянок з усталеним режимом можливо використання логарифмічно нормального розподілу. При усталених процесах коефіцієнт несиметрії струмового навантаження знаходиться в діапазоні 0-10%.

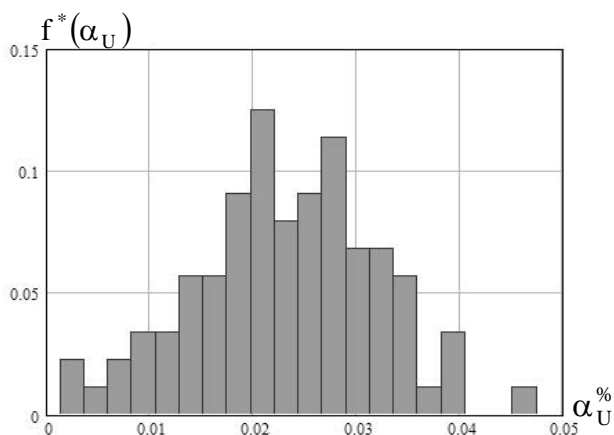


Рисунок 5 – Статистична функція щільності коефіцієнта несиметрії лінійних напруг

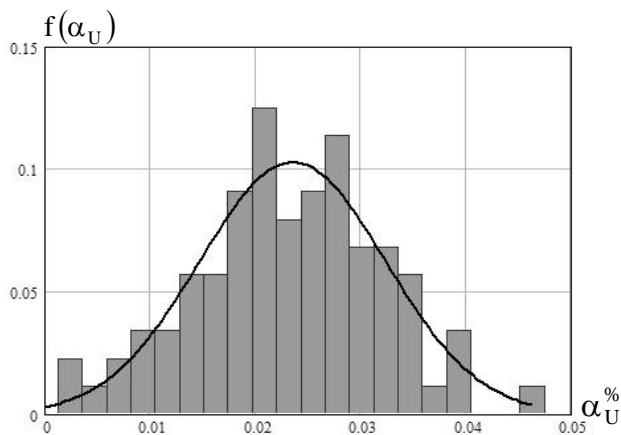


Рисунок 6 – Статистична функція щільності коефіцієнта несиметрії лінійних напруг, апроксимована нормальним розподілом

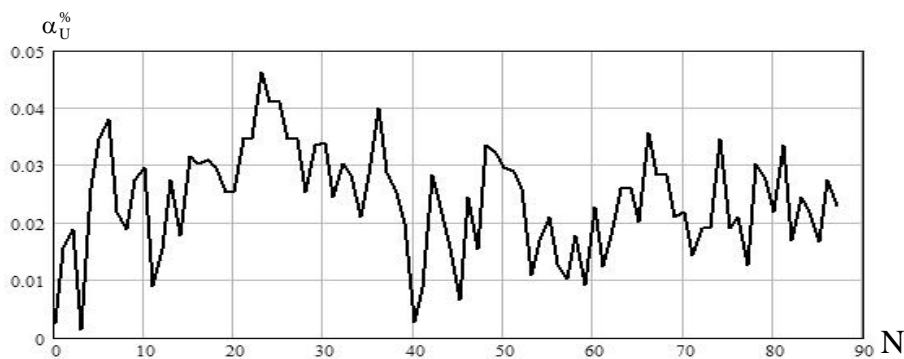


Рисунок 7 – Графік зміни коефіцієнта несиметрії напруг за період дослідження

Аналогічна задача ставилась відносно коефіцієнта несиметрії напруг на шинах 35 кВ. Дослідження показали, що коефіцієнт несиметрії напруг може бути описаний нормальним розподілом при середньому значенні 0,025%. Невелика величина α_U пояснюється удосконаленим пофазним регулюванням уставок за струмом, а головне – значною величиною потужності короткого замикання у точці підключення агрегату ПК. Між коливаннями струмів і коефіцієнтом α_1 існує усталена залежність: збільшення коливань струмів збільшує несиметрію. Так коефіцієнт кореляції між вказаними величинами дорівнює $K=0,979$. У той же час не простежується зв'язок коефіцієнта несиметрії напруг із середнім квадратичним відхиленням струму, а також коефіцієнтом несиметрії струмів.

Таким чином можна вважати, що для керування найбільш простим критерієм є сума дисперсії коливань струмів усіх фаз агрегату ПК, що співпадає з критерієм оптимізації дугових сталеплавильних печей. Фізично це пояснюється досить просто: виникнення температурної, електромагнітної, хімічної і інших неоднорідностей супроводжується як мінімізацією дисперсії струму однієї фази, так і сумарної дисперсії, яка може бути виміряна індикатором у кожній фазі.

Необхідно враховувати також наступний факт: несиметрія первинних струмів призводить до появи у розподільних мережах напруги зворотної послідовності, яка при визначених умовах може негативно впливати на нормальну роботу інших споживачів.

Висновки. Аналіз несиметричних режимів струмів може бути реалізованим у виробничих умовах. Накоплена з його допомогою інформація дозволяє експлуатаційному персоналу попереджати можливі випадки порушення регламентованої несиметрії

у мережі, що живить агрегат ПК, виявляти якість ведення технологічного процесу. Потім, провівши порівняльні оцінки випадків, коли ступінь несиметрії був мінімальним, з урахуванням супроводжуючих ці випадки умов роботи (кваліфікації обслуговуючого персоналу, ідентичності налагодження регуляторів різних фаз, якості живильної напруги в мережі) прийняти необхідні заходи щодо забезпечення роботи агрегату ПК по $\alpha_i = \min$ і таким чином зменшити витрати електроенергії на тону виплавленого металу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Статические компенсаторы реактивной мощности / под ред. В.А.Веникова. – М.: Энергия, 1975. – 136с.
2. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / под ред. Р.М.Матура; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160с.
3. Михеев Р.В. Повышение эффективности электроснабжения электропечей / Р.В.Михеев, А.П.Михеев, Ю.Л.Рыжиев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208с.
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / Иванов В.С., Соколов В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
5. Хмельницький Е.Д. Експлуатаційні дослідження роботи статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності у разі живлення агрегату «піч-ківш» / Хмельницький Е.Д. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2015. – Випуск 1(26). – С.130-137.
6. Справочник по надежности / под ред. Б.Р.Левина. – Т.1/В. GRANT IRESON. – М.: Издательство «МИР», 1969. –248с.

Надійшла до редколегії 02.03.2016.

УДК 62-83:681.513.5

КЛЮЕВ О.В., к.т.н., доцент
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

Введение. Перспективным направлением реализации мощных электроприводов турбомеханизмов является использование асинхронной машины с фазным ротором в каскадных схемах включения. Структура системы векторного управления асинхронной машиной (АМ) с постоянным потокосцеплением может оказаться нерациональной, так как стабилизация системой управления модуля вектора потокосцепления на уровне номинального значения приводит к снижению коэффициента мощности при моментах нагрузки электропривода меньше номинального. Указанным недостатком обладают регулируемые электроприводы нагрузочных машин с вентиляторной механической характеристикой.

Аналитические выражения, позволяющие определить значения потокосцепления статора асинхронного вентиляционного каскада (АВК), при котором его энергетические характеристики достигают экстремума, получены в [1]. Однако в этой работе вычисления проводились без учёта явления насыщения магнитопровода, что выражается во влиянии величины потокосцепления на значения индуктивностей АМ. При формировании