

**ВПЛИВ ДИСБАЛАНСУ ОПОРІВ ОБМОТОК СТАТОРА  
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА. ОЦІНКА НЕСИМЕТРІЇ ФАЗНИХ СТРУМІВ**

*С. О. Прокопенко, аспірант кафедри інженерії енергосистем*

*В. Є Кривоносов, доктор технічних наук, професор*

*В. В. Кривоносов, аспірант кафедри інженерії енергосистем*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*E-mail: [kryvvonosov@nubip.edu.ua](mailto:kryvvonosov@nubip.edu.ua)*

**Анотація.** Несиметрія активних опорів обмоток статора зустрічається у 30 % відремонтованих асинхронних двигунів, що експлуатуються в електроенергетичних комплексах морських портів, промислових підприємств та суден. Несиметрія опорів викликає появу несиметрії струмів в обмотках за симетричної напруги живлення. При несиметричній мережі несиметрія активних опорів викликає як збільшення, так і зменшення коефіцієнта несиметрії струмів. Використання системи Mathcad дозволяє розрахувати коефіцієнт несиметрії струмів при зміні відхилення напруги мережі живлення, відхилень активних опорів обмоток статора, струмового навантаження та частоти мережі живлення.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, несиметрія активних опорів, несиметрія напруг, коефіцієнт несиметрії струмів

**Актуальність.** У системі електропостачання агротехнічних комплексів та промислових підприємств асинхронний привод споживає до 40 % усієї споживаної електроенергії [1]. Більше 60 % всього обладнання становлять асинхронні двигуни (АД). Умови низької якості напруги мережі живлення, підвищена вологість, запиленість, а також технологічні та випадкові струмові та механічні перевантаження на валу АД призводять до високого рівня пошкоджень двигунів. Щорічне ушкодження АД становить до 20–25 % від загальної кількості встановлених АД. Основною причиною аварійного стану АД є вихід із ладу обмоток статора. Статистичні дані виходу АД з експлуатації, наведено у табл. 1 відповідно до [2].

### 1. Основні причини виходу АД з ладу

| Вузол АД            | % від загальної кількості пошкоджень | Примітки  |
|---------------------|--------------------------------------|---|
| Обмотка статора     | 75                                   | з них: 70 % припадає на лобову та пазову частину, 30 % складають перекриття та пробої ізоляції в коробках виводів |
| Підшипниковий вузол | 15                                   |   |
| Ротор               | 5                                    |   |
| Приводний механізм  | 5                                    |   |

У сучасних економічних умовах експлуатація багаторазово відновлюваних АД, що вийшли з ладу, є економічно вигідним. Практика експлуатації післяремонтних АД показує, що їхній термін служби у 3–4 рази коротший, ніж до ремонту [3]. У приблизно 85 % АД, які надходять у ремонт, здійснюється заміна обмоток статора.

Дослідження причин зниження терміну експлуатації післяремонтних двигунів показали, що 4–20 % таких АД після заміни обмоток статора мають розкид активних опорів обмоток.

Статистичні дані дослідження наведено в таблиці 2.

### 2. Коефіцієнт дисбалансу активних опорів післяремонтних АД

| Потужність АД                                       | P < 15 кВт | P = 15 – 63 кВт | P > 75 Вт |
|---|------------|-----------------|-----------|
| Коефіцієнт дисбалансу опорів $r_{oc}$ , %           | 0 – 4,8 %  | 0 – 5,5 %       | 0 – 3 %   |
| % від загальної кількості двигунів, що ремонтуються | 20 %       | 11 %            | 4 %       |

В електроремонтних цехах відносний коефіцієнт розкиду активних опорів визначається за виразом:

$$r_{oc} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Наведена відносна величина активних опорів обмоток статора АД до найбільшого значення однієї з обмоток визначається виразом:

$$\Delta r_i = 1 - \frac{r_i}{r_{max}} \quad (2)$$

де  $\Delta r_i$  – відносне збільшення опору обмотки фаз А, В або С;  $r_i$  - регламентоване значення опору обмоток;  $r_i$  – найбільше значення активного опору однієї з фазних обмоток статора.

Наведена відносна величина активних опорів обмоток статора АД до довідкового значення однієї з обмоток визначається виразом:

$$\Delta r = 1 - \frac{r_1'}{r_{1ном}}, \quad (3)$$

де  $r_{1ном}$  - довідкове значення величини активного опору фазної обмотки статора;  $r_1'$  - фактично виміряне значення активного опору.

Розмір коефіцієнта дисбалансу активних опорів обмоток статора АД, визначиться виразом:

$$k_{dz} = \frac{Z_{пр}}{Z_{обр}}, \quad (4)$$

де  $Z_{пр}$  та  $Z_{обр}$  - умовно прийняті опори "прямої" і "зворотної" послідовностей обмоток АД трифазної системи.

Нерівність активних опорів фазних обмоток статора призводить до дисбалансу фазних струмів, появи коефіцієнта несиметрії струмів, збільшення гальмівного моменту на валу АД і, як наслідок, до додаткового нагрівання найбільш навантаженої обмотки, що є причиною зниження терміну служби ізоляції статорних обмоток.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботі [4] проведено оцінку адекватності теплової моделі асинхронного двигуна (АД), що працює в умовах низької якості електроенергії. Як математичну модель використано однокільцеву динамічну теплову модель АД, описану диференціальним рівнянням такого виду:

$$\Delta P = A \cdot \Theta + \frac{\Delta \Theta}{\Delta t} C, \quad (5)$$

де  $\Delta P$  – потужність втрат, що виділяються в електродвигуні;  $\Theta$  – перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища;  $\Delta \Theta$  – перевищення температури двигуна за час  $\Delta t$ ;  $A$  – коефіцієнт тепловіддачі, Дж/(с·°С)  $C$  - теплоємність двигуна, Дж/°С.

Проведений порівняльний аналіз характеристик нагрівання обмоток АД при несиметрії мережі. На підставі методу симетричних складових отримані рівняння фазних струмів та залежність між коефіцієнтом несиметрії напруги та величиною відхилення напруги.

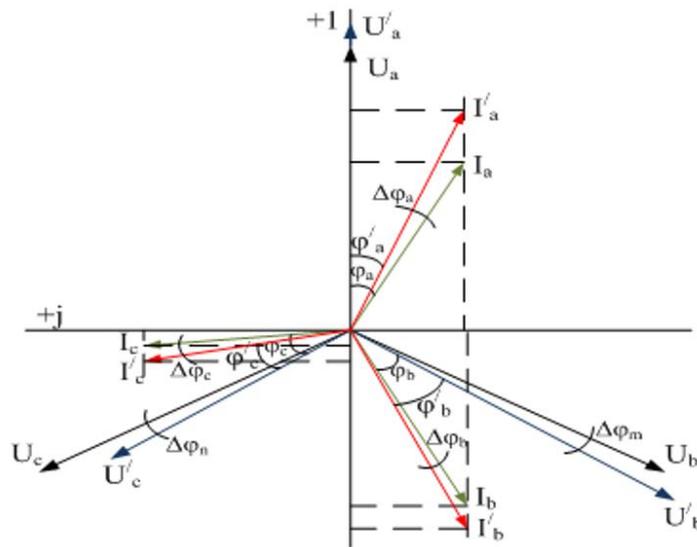


Рис. 1. Векторна діаграма струмів та напруги

У роботі [6] на основі методу симетричних складових отримано аналітичні залежності для  $m$ -фазної асинхронної машини з несиметричними обмотками в просторі статора.

У роботі [7] автори розробили методику розрахунку характеристик асинхронних двигунів за наявності несиметрії обмоток статора, особливістю якої є введення штучного контуру на роторі, по якому протікає струм зворотної послідовності. Розроблено математичну модель, що являє собою систему рівнянь ЕРС і моментів, яка дає змогу розраховувати струми у контурах статора й ротора у комплексній формі. Дослідження теплових режимів ізоляції обмоток за наявності несиметрії напруг і дисбалансу активних опорів є актуальними під час аналізу зменшення терміну служби післяремонтних АД. У відомих джерелах ці питання досліджені недостатньо.

**Мета дослідження** – аналіз впливу відхилень активних опорів обмоток статора АД на появу несиметрії фазних струмів за наявності динамічно змінних відхилень і несиметрії напруг у живлячій мережі.

**Матеріали та методи дослідження.** Використано теплові та електричні методи дослідження із застосуванням векторного аналізу та диференціального обчислення.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Відхилення активних опорів обмоток статора призводить до зміни модулів та збільшення кутів зсуву між фазними струмами та напругами. На рис. 1 наведено векторну діаграму струмів і напруг обмоток статора при несиметрії напруги мережі живлення та наявності відхилень активних опорів обмоток статора АД.

На рис.1 позначено:  $U_a, U_b, U_c$  – симетричні фазні напруги;  $U'_a, U'_b, U'_c$  – фазні напруги при несиметрії напруги джерела живлення;  $I_a, I_b, I_c$  – фазні струми при наявності несиметрії напруги мережі живлення;  $I'_a, I'_b, I'_c$  – фазні струми при наявності несиметрії напруги джерела живлення та активних опорів у обмотках статора АД;  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  – фазні кути між напругами  $U'_a, U'_b, U'_c$  та струмів  $I_a, I_b, I_c$ ;  $\varphi'_a, \varphi'_b, \varphi'_c$  – кути між напругами  $U'_a, U'_b, U'_c$  та струмами  $I'_a, I'_b, I'_c$ .

Додатковий зсув фазних кутів на величину  $-\Delta\varphi$ , викликаний відхиленням активних опорів у фазах АД, визначиться такими виразами:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_a &= \varphi_a - \varphi'_a \\ \Delta\varphi_b &= \varphi_b - \varphi'_b \\ \Delta\varphi_c &= \varphi_c - \varphi'_c\end{aligned}\tag{6}$$

Фазні кути, за [7], дорівнюють:

$$\varphi_a = \arctg \frac{x_a}{r_a};\tag{7}$$

$$\varphi'_a = \arctg \frac{x_a}{r'_a},\tag{8}$$

де  $x_a$  – індуктивна складова загального опору фази А АД;  $r_a$  – активна складова загального опору фази А АД;  $r'_a$  – активна складова загального опору фази А АД; при відхиленні активного опору від номінального (довідкового) за (3);  $\varphi_b, \varphi'_b, \varphi_c, \varphi'_c$  – кути визначаються аналогічно.

Для визначення складових опорів АД на рис.2 представлено Т- схему заміщення АД.

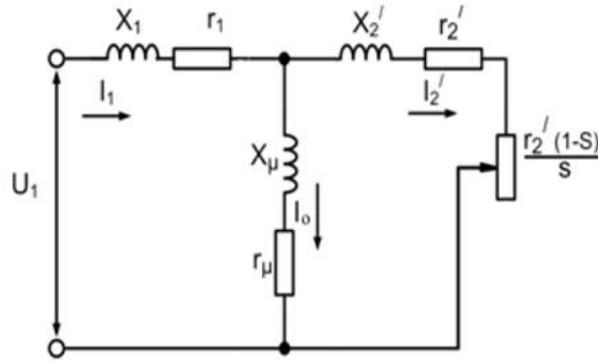


Рис. 2. Т-подібна схема заміщення АД

На рис. 2 позначено:  $r_1$ ,  $x_1$  – активний та індуктивний опори розсіювання статорної обмотки;  $r_2'$ ,  $x_2'$  – зведені до статорної обмотки активний та індуктивний опори роторної обмотки;  $r_\mu$ ,  $x_\mu$  – активний та індуктивний опори намагнічувального контура,  $s$  – ковзання.

Складові комплексного опору АД –  $r_a$ ,  $r_a'$  і  $x_a$  визначаються виразами:

$$x_a = x_1 + \frac{x_2' \cdot Z_\mu^2 + x_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left( \frac{r_2' \cdot r_\mu}{s} + x_2' \cdot x_\mu \right)} ; \quad (9)$$

$$r_a = r_1 + \frac{\frac{r_2'}{s} \cdot Z_\mu^2 + r_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left( \frac{r_2' \cdot r_\mu}{s} + x_2' \cdot x_\mu \right)} ; \quad (10)$$

$$r_a' = r_1' + \frac{\frac{r_2'}{s} \cdot Z_\mu^2 + r_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left( \frac{r_2' \cdot r_\mu}{s} + x_2' \cdot x_\mu \right)} , \quad (11)$$

де  $Z_2' = \sqrt{\left( \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_2')^2}$ ;  $Z_\mu = \sqrt{(r_\mu)^2 + (x_\mu)^2}$ ;  $r_1'$  – активний опір обмотки статора АД

фази А за наявності відхилення від номінального значення на величину  $\Delta r$ .

Система симетричних складових фазових напруг дорівнює:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= |U_n| ; \\ \dot{U}_b &= |U_n| \cdot a^2 ; \\ \dot{U}_c &= |U_n| \cdot a , \end{aligned} \quad (12)$$

де  $a = -0,5 + j0,866$  – фазовий оператор зсуву.

Система фазових напруг (12) за наявності відхилення напруги від номінального значення, визначається так:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= D \cdot |U_n|; \\ \dot{U}_b &= M \cdot |U_n| \cdot a^2 \cdot e^{j\Delta\varphi_m}; \\ \dot{U}_c &= N \cdot |U_n| \cdot a \cdot e^{j\Delta\varphi_n},\end{aligned}\quad (13)$$

де  $D, M, N$  – коефіцієнти, що враховують відхилення фазних напруг від номінального значення.

$\Delta\varphi_m, \Delta\varphi_n$  – додаткові фазові кути зсуву;

$$\Delta\varphi_m = \frac{2\pi}{3} - \arccos\left(\frac{|\dot{U}_a|^2 + |\dot{U}_b|^2 - |\dot{U}_{ab}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_a| \cdot |\dot{U}_b|}\right); \quad (14)$$

$$\Delta\varphi_n = \arccos\left(\frac{|\dot{U}_c|^2 + |\dot{U}_a|^2 - |\dot{U}_{ca}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_c| \cdot |\dot{U}_a|}\right) - \frac{2\pi}{3}. \quad (15)$$

Загальний опір АД

$$\begin{aligned}\dot{Z}_a &= T_a \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi'_a} = T_a \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_a + \Delta\varphi_a}; \\ \dot{Z}_b &= T_b \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi'_b} = T_b \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_a + \Delta\varphi_b}; \\ \dot{Z}_c &= T_c \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi'_c} = T_c \cdot |Z_n| \cdot e^{j\varphi_a - \Delta\varphi_c};\end{aligned}\quad (16)$$

де  $T_a, T_b, T_c$  – коефіцієнти, що враховують кратність зміни комплексних опорів АД.

Фазні струми АД визначаються виразом:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\dot{Z}_a} = \frac{D \cdot |U_n|}{T_a \cdot |Z_n|} \cdot e^{-j(\varphi_a + \Delta\varphi_a)} = H \cdot |I_n| \cdot e^{-j(\varphi_a + \Delta\varphi_a)}; \quad (17)$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\dot{Z}_b} = \frac{M \cdot |U_n|}{T_b \cdot |Z_n|} \cdot a^2 \cdot e^{j(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b)} = L \cdot |I_n| \cdot a^2 \cdot e^{j(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b)}; \quad (18)$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\dot{Z}_c} = \frac{N \cdot |U_n|}{T_c \cdot |Z_n|} \cdot a \cdot e^{j(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)} = J \cdot |I_n| \cdot a \cdot e^{j(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}, \quad (19)$$

де  $H = \frac{D}{T_a}$ ;  $L = \frac{M}{T_b}$ ;  $J = \frac{N}{T_c}$ ;  $I_n$  – номінальне значення струму АД.

Струм прямої та зворотної послідовностей за [4] визначаються виразом:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c}{3}; \quad (20)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_b + a \dot{I}_c}{3} \quad (21)$$

Згідно (20), (21) и (17)–(19) струми  $I_1$  та  $I_2$  дорівнюють:

$$\dot{I}_1 = \frac{|I_H|}{3} \cdot V \cdot e^{j\varphi_V}; \quad (22)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{|I_H|}{3} \cdot Q \cdot e^{j\varphi_Q}; \quad (23)$$

де  $V$  та  $Q$  – коефіцієнти, які враховують наявність несиметрії напруг та дисбалансу активних опорів у обмотках статора АД, які визначаються виразом:

$$V = \sqrt{\frac{H^2 + L^2 + J^2 + 2HL \cos(\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_b) + 2HJ \cdot \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_c)}{+ 2LJ \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_m - \Delta\varphi_b - \Delta\varphi_c)}}; \quad (24)$$

$$Q = \sqrt{\frac{H^2 + L^2 + J^2 + 2HL \cos(\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + 2HJ \cdot \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})}{+ 2LJ \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_m - \Delta\varphi_b - \Delta\varphi_c - \frac{2\pi}{3})}}, \quad (25)$$

де  $\varphi_V$  та  $\varphi_Q$  – аргументи и струмів прямої и зворотної послідовностей:

$$\varphi_V = \arctg \frac{H \sin(-\varphi_a - \Delta\varphi_a) + L \sin(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b) + J \sin(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}{H \cos(-\varphi_a - \Delta\varphi_a) + L \cos(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b) + J \cos(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}; \quad (26)$$

$$\varphi_Q = \arctg \frac{H \sin(-\varphi_a + \Delta\varphi_a) + L \sin(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + J \sin(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})}{H \cos(-\varphi_a + \Delta\varphi_a) + L \cos(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + J \cos(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})} \quad (27)$$

Коефіцієнт несиметрії струмів визначаються виразом:

$$k_{2I} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \cdot 100\% = \frac{Q}{V} \cdot 100\% \quad (28)$$

Враховуючи (22) та (23), втрати потужностей в АД визначаються виразом:

$$\Delta P_a = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2\right); \quad (29)$$

$$\Delta P_b = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q + \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right); \quad (30)$$

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q - \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right), \quad (31)$$

де  $\Delta P_{ном} = I_{ном}^2 \cdot r_{1ном}$  – втрати потужності у фазі АД при номінальному навантаженні, відсутності відхилення напруги та активних складових опорів обмоток АД.

За [4, 5] температура обмотки фази А з урахуванням (29) визначиться виразом:

$$\Theta_a = \frac{\Theta_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot (1 + 2 \cdot k_{2U} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{Y}}\right) \quad (32)$$

де  $\Theta_a$  – перевищення температури обмотки фази А при наявності несиметрії напруг мережі живлення та дисбалансу активних складової обмоток статора АД;  $\Theta_{ном}$  – перевищення температури обмотки статора АД відповідне номінальному режиму;  $t$  – час;  $Y$  – стала часу нагрівання АД.

Натурні дослідження впливу відхилення напруги на додаткові втрати потужності у обмотки статора АД проведені для АД марки МТ011-6 який має параметри:  $P_n = 1,4$  кВт,  $U = 380/220$  В,  $n_n = 895$  об/хв,  $\cos\varphi_n = 0,67$ ,  $\eta_n = 0,65$ ,  $\lambda = 2,7$ ,  $k_n = 2,4$ ,  $k_{ni} = 3$ . В табл.3, наведені результати дослідження втрат потужності при наявності відхилення напруги у мережі живлення

**3. Втрати потужності за наявності відхилення напруги  $\Delta U_a = +7$  В,  $\Delta U_b = +2,1$  В,  $\Delta U_c = -10,9$  В ( $k_{2U} = 2,03$  %) та наявності дисбалансу активних опорів у обмотках статора АД**

| Втрати потужності, Вт | $\Delta r = +(4 \text{ и } 8) \%$ |        |        |        |       |       |       |       |       |
|-----------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | А                                 |        |        | В      |       |       | С     |       |       |
|                       | 0                                 | 4      | 8      | 0      | 4     | 8     | 0     | 4     | 8     |
| $\Delta P_a$          | 109,88                            | 106,11 | 102,22 | 109,88 | 110,0 | 110,2 | 109,8 | 109,6 | 109,3 |
| $\Delta P_b$          | 105,1                             | 104,7  | 104,2  | 105,1  | 101,0 | 96,7  | 105,1 | 105,0 | 105,3 |
| $\Delta P_c$          | 93,1                              | 93,3   | 93,7   | 93,1   | 93,3  | 93,6  | 93,1  | 90,2  | 87,2  |
|                       | $\Delta r = -(4 \text{ и } 8) \%$ |        |        |        |       |       |       |       |       |
|                       | А                                 |        |        | В      |       |       | С     |       |       |
|                       | 0                                 | 4      | 8      | 0      | 4     | 8     | 0     | 4     | 8     |
| $\Delta P_a$          | 109,8                             | 114,5  | 119,3  | 109,8  | 109,5 | 109,3 | 109,8 | 110,1 | 110,4 |
| $\Delta P_b$          | 105,1                             | 105,6  | 106,0  | 105,1  | 110,3 | 115,5 | 105,1 | 105,2 | 105,5 |
| $\Delta P_c$          | 93,1                              | 92,8   | 92,5   | 93,1   | 92,8  | 92,6  | 93,1  | 96,8  | 100,3 |

Дані, наведені у табл.3, свідчать, що відхилення напруги  $\Delta U_a = +7$  В,  $\Delta U_b = +2,1$  В,  $\Delta U_c = -10,9$  В, призводять до появи коефіцієнта несиметрії напруги  $k_{2U} = 2,03$  %, та перевищенню втрат потужності на 6,5 % а температури обмотки статора АД на 4,6 °С.

### Висновки і перспективи.

1. Однією з причин зниження терміну служби післяремонтних АД у 1,5–2.2 рази нижче доремонтного терміну експлуатації є дисбаланс активних опорів обмоток статора АД понад 5 %.

2. Відхилення фазної напруги в межах 5% за наявності дисбалансу активних опорів обмоток статора АД в межах 5 % призводить до додаткового нагрівання ізоляції обмотки однієї з фаз до 7 °С.

### Список використаних джерел

1. Савченко П.І., Лавріненко О.Ю., Синявський О.Ю., Войтюк В.В., Савченко В.В., Голодний І.М. Основи електропривода: підручник. К.: Видавництво Ліра-К, 2017. 524 с
2. Радіонов А.В. Вплив режимів роботи асинхронних електродвигунів з їхньої працездатність. Вісник СНАУ, Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів. Вип. 10/1 (29). 2016. С. 156–161.
3. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів. Кременчук: ЧП Щербатых А. В., 2019. 122 с.
4. Ясинський Ю.О., Немчинов А.О., Нікішин О.М Прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання з урахуванням якості споживаємої електроенергії. Науковий журнал Системи обробки інформації. 2010. Вип. 9 (90). С. 130-133.
5. Василенко В. В., Кривонос В. Є. Управління ресурсом роботи асинхронного двигуна в умовах несиметрії мережі живлення. Науковий вісник ДДМА. Вип. 2 (10Е). Краматорськ: ДДМА, 2012. С. 14-24.
6. Горошко, А., Каштальян, А.. Вплив несиметрії напруги живлення на характеристики асинхронного двигуна. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 2025, 353(3.2), 110-113. Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-13>
7. Квітка С.О., Вовк О.Ю., Стюпін О.Ю., Квітка О.С., Дослідження теплових процесів асинхронних електродвигунів під впливом неповнофазного режиму роботи. Праці ТДАТУ. 2021. Вип. 15, т. 2. С. 118-222.
8. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.: Энергия, 1984. 240 с.
9. Krivonosov V.E., Vasilenko S.V. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data. Österreichisches Multiscience Journal. – Innsbruck (Austria), 2019. Vol. № 18. P. 36–42.

### References

1. Savchenko, P. I., Lavrinenko, O. Yu., Synyavskiy, O. Yu., Voityuk, V. V., Savchenko, I. M., & Holodnyi, I. M. (2017). *Osnovy elektropyvoda [Fundamentals of electric drive]: Textbook*. Kyiv: Lira-K Publishing House, 517.

2. Radionov, A. V. (2016). Vplyv rezhymiv roboty asynkhronnykh elektrodvyhuniv z yikhnoi pratsezdannist [Influence of operating modes of induction motors on their performance]. Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes, 10(1)(29), 156–161.
3. Chornyi, O. P., Zachepa, Yu. V., Tytiuk, V. K., & Chorna, O. A. (2019). Monitoryng i diahnostryka elektromekhanichnykh ob'iektiv [Monitoring and diagnostics of electromechanical objects: Textbook]. Kremenchuk: Shcherbatykh A. V. Publishing, 122.
4. Yasynskiy, Yu. O., Nemchynov, A. O., & Nikishyn, O. M. (2010). Prediction of the technical state of electrical equipment insulation considering the quality of consumed electric power. Information Processing Systems Scientific Journal, 9(90), 130–133.
5. Vasylenko, V. V., & Kryvonosov, V. Ye. (2012). Upravlinniam resursom roboty asynkhronnoho dvyhuna v umovakh nesymetrii merezhi zhyvlennia [Management of induction motor operation resource under supply network asymmetry conditions]. Scientific Bulletin of Donbas State Engineering Academy, 2(10E), 14–24.
6. Horoshko, A., & Kashtalian, A. (2025). Vplyv nesymetrii napruhy zhyvlennia na kharakterystyky asynkhronnoho dvyhuna [Influence of supply voltage asymmetry on the characteristics of an induction motor]. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 353(3.2), 110–113. Available at: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-13>
7. Kvitka, S. O., Vovk, O. Yu., Stiopin, Yu. O., & Kvitka, O. S. (2015). Doslidzhennia teplovykh protsesiv asynkhronnykh elektrodvyhuniv pid vplyvom nepovnofaznogo rezhymu roboty [Investigation of thermal processes of induction motors under the influence of an incomplete-phase operating mode]. Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University, 15(2), 118–122.
8. Syromyatnikov, I. A. (1984). Operating modes of induction and synchronous motors. Moscow: Energiya.
9. Krivonosov, V. E., & Vasilenko, S. V. (2019). Comparative analysis of methods for calculating parameters of asynchronous motors based on reference data. Österreichisches Multiscience Journal, 18, 36–42.

## **THE INFLUENCE OF STATOR WINDING RESISTANCE IMBALANCE OF AN INDUCTION MOTOR: EVALUATION OF PHASE CURRENT ASYMMETRY**

*S. Prokopenko, V. Kryvonosov, V. Kryvonosov*

**Abstract.** *Asymmetry of the active resistances of stator windings occurs in approximately 30 % of repaired induction motors operating in power complexes of seaports, industrial enterprises, and ships. The resistance asymmetry causes current imbalance in the windings even under symmetrical supply voltage. In a non-symmetrical network, the asymmetry of active resistances can both increase and decrease the current asymmetry coefficient.*

*The use of the Mathcad system enables the calculation of the current asymmetry coefficient depending on the deviation of the supply voltage, variation of stator winding resistances, load current, and supply frequency.*

**Key words:** *induction motor, active resistance asymmetry, voltage asymmetry, current asymmetry coefficient*