

## СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА СТАНУ ПОТУЖНИХ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У ПРОЦЕСІ ЇХ РОБОТИ

Чорний О.П., д.т.н., проф., Сидоренко В.М., старш. викл., Воробейчик О.С., інж.

Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., Україна, 39600

E-mail: [apch@kdu.edu.ua](mailto:apch@kdu.edu.ua)

Богатирьов К.М., заст. головного енергетика

ВАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат»

вул. Будівельників, 16, м. Комсомольськ, Полтавської обл., Україна, 39802

Розглянуто метод застосування статистичних оцінок режиму роботи синхронного двигуна для оцінки його стану при існуючій несиметрії питомого наантаження. Метод може застосовуватися при проведенні моніторингу електричного приводу без зупинки технологічного процесу.

**Ключові слова:** статистична оцінка, режим роботи, синхронний двигун, моніторинг.

**Вступ.** За умов стану сучасної економіки та розвитку виробництва до першочергових завдань відносять енергоресурсозбереження, моніторинг та визначення ресурсу електромеханічного обладнання. Вирішення вказаних задач неможливе без визначення його поточного стану. Особливо це відноситься до енергоємних об'єктів, зупинки яких для обстеження призводять до втрат продуктивності і, зрозуміло, суттєвих збитків. Тож актуальною є задача поточної оцінки стану й режимів роботи потужного електромеханічного обладнання.

**Мета роботи.** Застосування статистичних оцінок режиму роботи СД для аналізу його стану.

Матеріал і результати дослідження. В якості досліджуваної системи електроприводу з СД розглянемо електропривод подрібнювального шарового млина фабрики виробництва окатишів ВАТ «Полтавський ГЗК». Вибраний електропривод є типовим енергоємним об'єктом. Незважаючи на те, що на фабриці у кожній секції встановлено по 4 млини з СД потужністю 2500 кВт, кожний з них підключений до окремої чарунки на ГПП (головна понижуюча підстанція). Вся існуюча на підприємстві система електропостачання й системи електроприводу пов'язані єдиною системою автоматизації. У чарунках ГПП встановлені

вимірювальні системи РМ130 PLUS, які здійснюють безперервне вимірювання основних параметрів режиму роботи СД за схемою, наведеною у табл.1, при цьому запис здійснюється один раз на хвилину.

**Таблиця 1 – Параметри режиму роботи електроприводу, вимірювані на ГПП**

Дата	PA [МВт]	PQ [МВАр]	кут $\Phi$ [°]	cos( $\Phi$ )	Ua [В]
Ub [В]	Uc [В]	Ia [А]	Ib [А]	Ic [А]	F [Гц]

Для аналізу, як приклад, використані вимірювання, проведені 9 січня 2010 р. Дані представимо у вигляді серії з  $n=1422$  записів (протягом доби з інтервалом відліків  $\Delta t = 1$  хв.) фазних напруг (рис.1) і струмів (рис.2) синхронного двигуна. На рис. 1 видно, що в мережі живлення існує несиметрія напруги, котра викликана зовнішніми причинами. Аналіз причин несиметрії являє собою окрему задачу й в даній роботі не розглядається.

Задачі аналізу сформулюємо наступним чином.

1. Оцінити характер зміни напруги та струму за період вимірювання.

2. Виконати аналіз несиметрії струмів, з'ясувати можливі причини й перевірити її значущість із застосуванням методів аналізу даних.

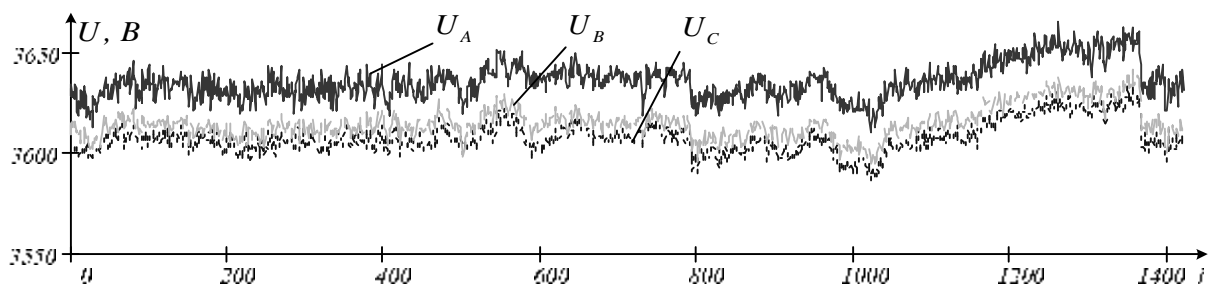


Рисунок 1 – Часові залежності напруги за фазами двигуна

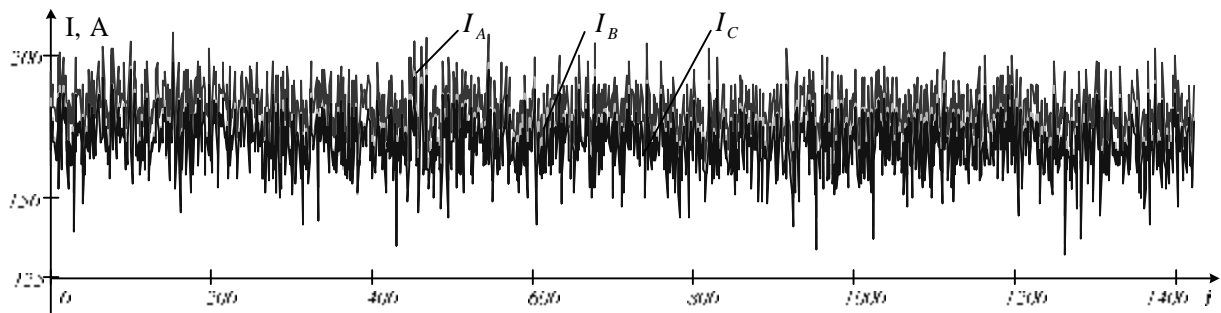


Рисунок 2 – Часові залежності струмів фаз двигуна

Розв'язання цих задач важливо з точки зору поточного стану СД, адже несиметрія струмів виникає за умови існуючої або прогресуючої параметричної несиметрії параметрів. Своєчасне встановлення наявності несиметрії дозволяє виконати оцінку стану СД. Однак за існуючої несиметрії напруги параметричні зміни можуть бути не розпізнані.

Перерахуємо серії записів з дискретних відліків на часові. Розрахунок часу виконується за виразом:

$$t = \frac{i}{1440}, \text{ хв.}$$

Візуальний аналіз показує, що вищезазначені сигнали, з одного боку, мають чітко виражену несиметрію, а з іншого - їх характер суттєво відмінний. Для більш детального аналізу було виконано оцінювання автокореляційних функцій (АКФ) обох процесів для кожної з трьох фаз (на прикладі фази А – рис. 4, 7) [2, 3]:

$$r_m = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} [(u_i - \bar{u})(u_{i+m} - \bar{u})]}{(n-1)\tilde{\sigma}^2},$$

де  $\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i n_i$  - середнє

арифметичне;  $\tilde{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 n_i$  - виправлена

оцінка дисперсії; та оцінки частинних автокореляційних функцій (ЧАКФ) (на прикладі фази А, рис. 5, 8). Оцінки АКФ напруг експоненційно спадають, а ЧАКФ мають декілька значущих лагів, що властиво для AR-процесів або «кольорового шуму». У той же час аналогічні характеристики фазних струмів мають характеристики «білого шуму». Даний факт дає можливість зробити висновок, що коливання напруги не викликають відповідних коливань струмів. У підтвердження цьому на рис. 8 наведено оцінку взаємної кореляційної функції (ВКФ) для фази А:

$$r_m = \frac{\sum_{i=1}^{n-m} [(u_i - \bar{u})(i_{i+m} - \bar{i})]}{(n-1)\tilde{\sigma}^2},$$

яка вказує на відсутність будь-якої взаємної кореляції.

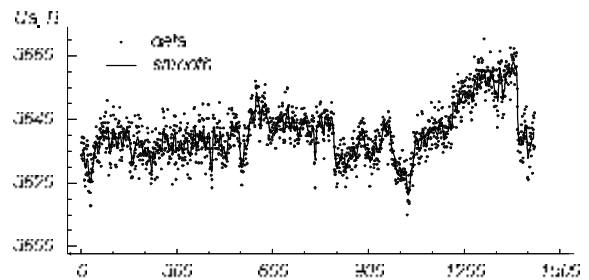


Рисунок 3 – Динаміка зміни напруги фази А (згладжена крива)

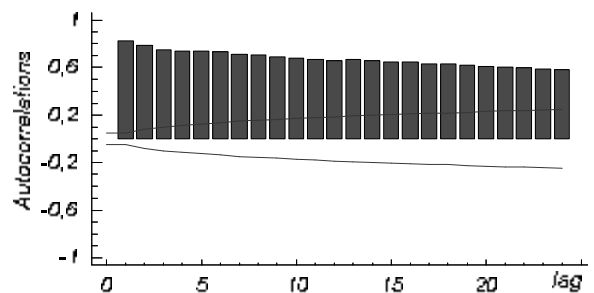


Рисунок 4 – Оцінка АКФ процесу добової зміни напруги у фазі А

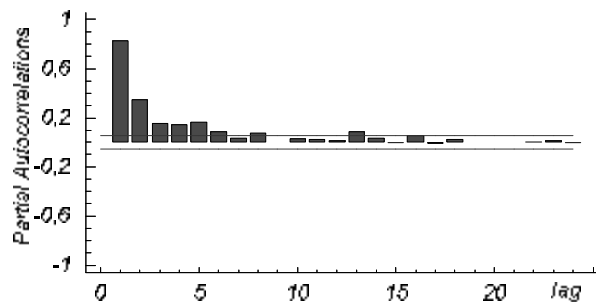


Рисунок 5 – Оцінка ЧАКФ процесу добової зміни напруги у фазі А

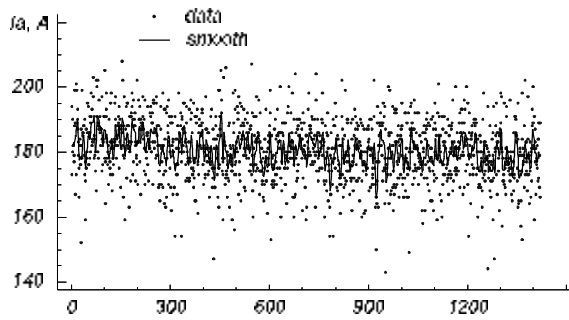


Рисунок 6 – Динаміка зміни струму фази А (згладжена крива)

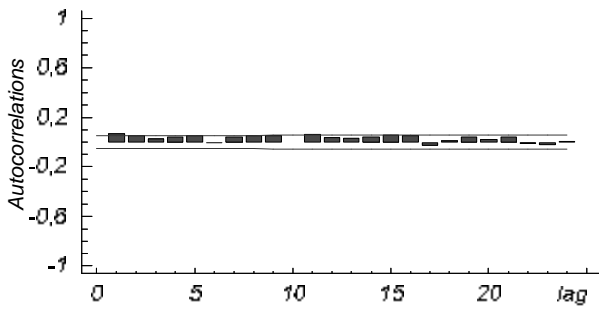


Рисунок 7 – Оцінка АКФ процесу добової зміни струму у фазі А

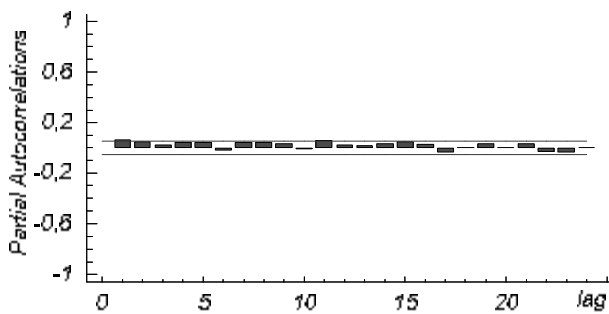


Рисунок 8 – Оцінка ЧАКФ процесу добової зміни напруги у фазі А

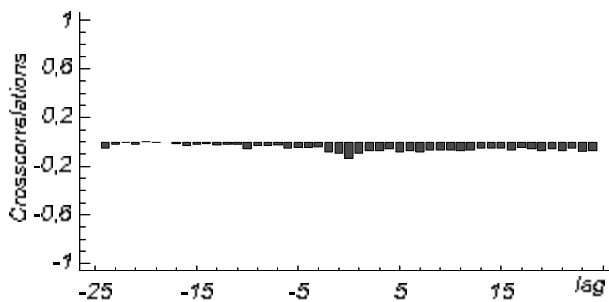


Рисунок 9 – Оцінка взаємної АКФ (кроскореляція) процесів добової зміни напруги і струму у фазі А

У табл. 2 представлені оцінки середніх та дисперсій сигналів напруг для кожної з фаз. Для перевірки значущості відмінностей середніх напруг по кожній фазі було застосовано однофакторний дисперсійний аналіз за Фішером, у припущенні, що умови для його застосування виконуються [4-6].

Таблиця 2 – Вибіркові характеристики сигналів напруги

Фаза	$\bar{u}$ , В	$M\tilde{e}$ , В	$\tilde{\sigma}^2(u)$	$\tilde{\sigma}(u)$
A	3635,8	3634,78	77,3842	8,79683
B	3614,95	3614,07	63,6781	7,97985
C	3607,86	3606,9	62,764	7,92237

Як видно з рис. 10, довірчі межі для будь-якої пари фаз не перетинаються один з одним, що говорить про наявність несиметрії фазних напруг.

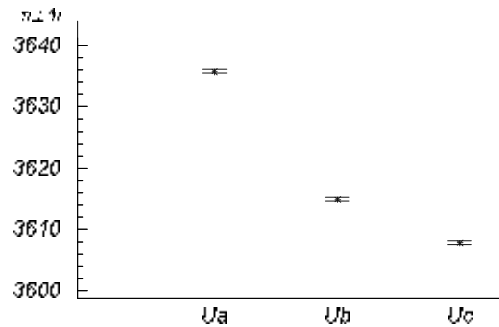


Рисунок 10 – 95-відсоткові довірчі інтервали для пофазних середніх напруг

Той же самий висновок можна зробити, розглядаючи результати дисперсійного аналізу (табл. 3). Оскільки значення емпіричної ймовірності (*P-Value*) менше, ніж 0,05, з надійністю 95% можна стверджувати, що середні арифметичні значення фазних напруг відрізняються значимо.

Таблиця 3 - (ANOVA Table) Результати дисперсійного аналізу за Фішером

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	600287,	2	300144,	4417,64	0,0000
Within groups	289841,	4266	67,9421		
Total (Corr.)	890128,	4268			

За аналогічною схемою було проведено аналіз для струмів, на основі чого були зроблені аналогічні висновки.

Таблиця 4 – Вибіркові характеристики сигналів струму

Фаза	$\bar{i}$ , А	$M\tilde{e}$ , А	$\tilde{D}(i)$	$\tilde{\sigma}(i)$
A	180,529	181,0	90,4097	9,5084
B	170,26	170,0	85,0392	9,22167
C	168,595	169,0	90,5296	9,5147

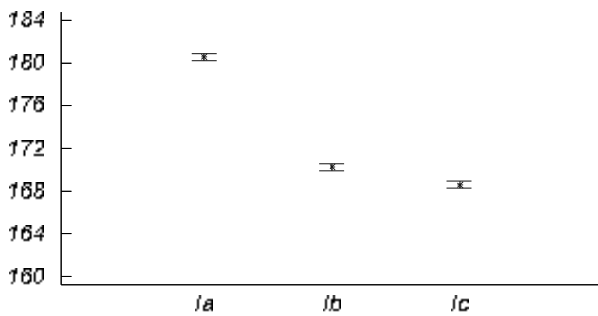


Рисунок 11 – 95-відсоткові довірчі інтервали для пофазних середніх струмів

Таблиця 5 - Результати дисперсійного аналізу за Фішером для струмів

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	118899,	2	59449,4	670,54	0,000
Within groups	378221,	4266	88,6595		
Total (Corr.)	497120,	4268			

Оцінка модулів комплексних опорів була здійснена за наступною схемою:

$$z_A(t) = \frac{u_A(t)}{i_A(t)}, z_B(t) = \frac{u_B(t)}{i_B(t)}, z_C(t) = \frac{u_C(t)}{i_C(t)}.$$

Після чого оцінки  $|Z_A|$ ,  $|Z_B|$ ,  $|Z_C|$  обчислювались як середнє арифметичне за часом:

$$|Z_A| = \bar{z}_A(t), |Z_B| = \bar{z}_B(t), |Z_C| = \bar{z}_C(t).$$

Оцінки провідності обчислювались як

$$\frac{I}{|Z_A|} = \frac{I}{z_A(t)}, \frac{I}{|Z_B|} = \frac{I}{z_B(t)}, \frac{I}{|Z_C|} = \frac{I}{z_C(t)}.$$

Таблиця 6 – Оцінки модулів комплексного опору по фазах

Фаза	$\bar{z}_A$ ,	$M\bar{z}$ , В	$\tilde{D}(z)$	$\tilde{\sigma}(z)$
A	20,1971	20,107	1,2017	1,09622
B	21,2959	21,2228	1,40887	1,18696
C	21,4697	21,3642	1,55868	1,24847

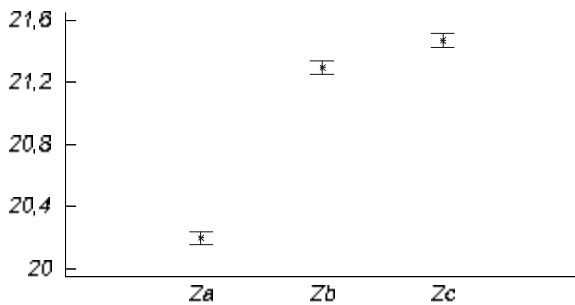


Рисунок 12 – 95-відсоткові довірчі інтервали для пофазних середніх модулів комплексних опорів

Таблиця 7 - Результати дисперсійного аналізу

за Фішером для опорів

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	1355,16	2	677,58	487,56	0,0000
Within groups	5928,67	4266	1,38975		
Total (Corr.)	7283,83	4268			

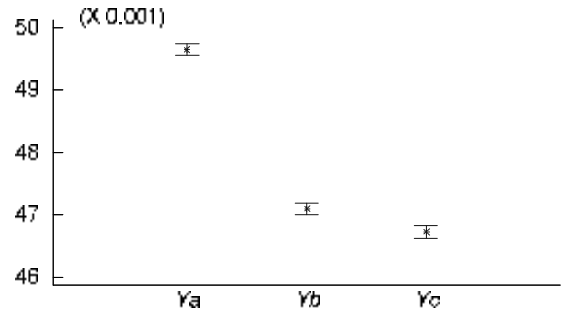


Рисунок 13 – 95-відсоткові довірчі інтервали для пофазних середніх провідностей

Таблиця 8 – Оцінки модулів провідності по фазах

Фаза	$\bar{u}$ , В	$M\bar{e}$ , В	$\tilde{D}(u)$	$\tilde{\sigma}(u)$
A	0,0496545	0,0497338	$6,9452 \cdot 10^{-6}$	$2,64 \cdot 10^{-3}$
B	0,0470998	0,0471191	$6,5777 \cdot 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$
C	0,0467305	0,0468073	$7,0071 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 9 - (ANOVA Table) Результати дисперсійного аналізу за Фішером для провідностей

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	0,00721587	2	$3,608 \cdot 10^{-3}$	527,22	0,000
Within groups	0,0291936	4266	$6,843 \cdot 10^{-6}$		
Total (Corr.)	0,0364094	4268			

Результати досліджень свідчать, що несиметрія струмів викликана несиметрією напруги на затискачах двигуна. Розподіл струмів відповідає теоретичним положенням [1] при заданому навантаженні на валу двигуна.

Для встановлення більш точного впливу несиметрії напруги живлення на режим роботи двигуна й визначення існуючої параметричної несиметрії обмоток необхідно здійснювати вимірювання щонайменше 200 значень за період зміни напруги мережі.

**Висновки.** Застосування статистичних оцінок

режиму роботи для аналізу стану СД дозволяє з розрахованою надійністю встановити, що існуюча несиметрія струмів фаз викликана параметричною несиметрією двигуна або параметрами мережі живлення. Пропонований метод може бути застосований при проведенні моніторингу електроприводу без зупинки технологічного процесу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Сыромятников И. А.; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – [4-е изд., переработ. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Марпл С. Л. - М.: Мир, 1990. - 584 с.
3. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы / Р. Отнес, Л. М. Эноксон. – М. : Мир, 1982. – 428 с.
4. Гласс Дж. Стэнли. Статистические методы в педагогике и психологии ; [перев. с англ.]. / Гласс Дж. Стэнли. - М.: Прогресс, 1976. – 496 с.
5. Дрейпер Н.. Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. Кн. 1 / Н. Дрейпер, Г Смит [перев.с англ.]. – 2-е изд., перераб. доп. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
6. Айвазян С. А.. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное издание / Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. - М.: Финансы и статистика, 1983. – 607 с.

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ РАБОТЫ

*Черный А.П., д.т.н., проф., Сидоренко В.Н., стари. преп., Воробейчик О.С., инж.  
Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Полтавская обл., Украина, 39600  
E-mail: [apch@kdu.edu.ua](mailto:apch@kdu.edu.ua)*

*Богатырев К.Н., замест. главного энергетика  
ОАО «Полтавский горно-обогатительный комбинат»  
ул. Строителей, 16, г. Комсомольск, Полтавской обл., Украина, 39802*

Рассмотрен метод применения статистических оценок режима работы синхронного двигателя для оценки его состояния при существующей несимметрии питающего напряжения. Метод может быть использован при проведении мониторинга электрического привода без остановки технологического процесса.

**Ключевые слова:** статистическая оценка, режим работы, синхронный двигатель, мониторинг.

## STATISTICAL ESTIMATION OF POWERFUL SYNCHRONOUS MOTOR IN THE COURSE OF THEIR WORK

*Chorniy O., prof. dr. hub. ing., Sidorenko V., Sen. Lect., Vorobeychuk O., Eng.  
Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University  
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine  
E-mail: [apch@kdu.edu.ua](mailto:apch@kdu.edu.ua)*

*Bogatyrev K., deputy chief power engineer  
OAS "Poltava ore-dressing plant"  
vul. Stroitelei, 16, Komsomolsk, 39802, Ukraine*

A method of application of statistical estimations of the mode of operations of synchronous machine for estimation of his state at the existent symmetry of feeding tension is considered. The method can be used for conducting monitoring an electric drive without the stop of technological process.

**Key words:** statistical estimation, mode of operations, synchronous machine, monitoring.