

УДК 621.365

АНАЛІЗ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Коваленко В.Л., д-р. техн. наук,

victor.l.kovalenko@gmail.com, ORCID:0000-0001-5950-4412

Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, (м. Запоріжжя, Україна)

Качура О.В., канд. техн. наук,

fem@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6338-0974

Дніпровський державний технічний університет, (м. Дніпро, Україна)

Сприса В. Б., аспірант*,

vbs86@ukr.net, ORCID: 0009-0003-5050-0310

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет» (м. Дніпро, Україна)

Гулеша О.М., канд. пед. наук,

e.gulesha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7512-5671

Трикіло А.І., канд. техн. наук,

Trukilo@i.ua, ORCID: 0000-0002-5203-5948

Дніпровський державний технічний університет, (м. Дніпро, Україна)

Кописов В. І.,

vlad.kopusta@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4950-4224

НТУ "Дніпровська політехніка", (м. Дніпро, Україна)

Башко В. Р.,

v.bashko7@gmail.com, ORCID: 0009-0007-7820-1944

Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, (м. Запоріжжя, Україна)

У статті представлено результати експериментально-теоретичних досліджень щодо комплексного впливу параметрів якості електроенергії – несиметрії та несинусоїдальності напруг - на технічні характеристики асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором. Дослідження актуальне в контексті сучасної енергетики, де питання якості електроенергії нерідко недооцінюється, що призводить до порушення електромагнітної сумісності в енергосистемах.

Для реалізації мети було створено експериментально-дослідну установку, що дозволяє штучно змінювати рівні симетрії та гармонійного складу напруг. Аналіз проводився за різних коефіцієнтів завантаження двигуна ($K_z = 0; 0.5; 1$). Вимірюванню підлягали: потужність по фазах, обертовий момент, частота обертання, ККД, струми у фазах.

* Науковий керівник – д-р тех. наук, професор Сасенко Ю.Л.

Застосування методу Бокса-Уїлсона дозволило побудувати регресійні моделі залежностей основних характеристик АД (швидкість обертання n_2 , момент M , ККД η) від коефіцієнтів несиметрії (K_{2U}) та несинусоїдальності (K_U) напруг.

Результати показали, що навіть незначна несиметрія може суттєво впливати на нагрівання двигуна та термін служби ізоляції. Наявність вищих гармонік, особливо 5-ої та 7-ої, викликає зниження коефіцієнта потужності до 25% порівняно із значенням при синусоїдальному живленні. При перевищенні допустимих рівнів вищих гармонійних складових (ВГ), згідно з ГОСТ 13109-97, виникає загроза іонізації та деградації ізоляції. Водночас у межах норми ВГ практично не впливають на механічні параметри двигуна.

Дослідження також виявило, що технічні характеристики не можуть бути уніфікованими для всіх типів АД, оскільки вони залежать від типу двигуна та умов його навантаження. Це свідчить про необхідність комплексного підходу до аналізу якості електроенергії, що враховує сукупну дію кількох чинників.

Ключові слова: асинхронний двигун, якість електроенергії, несиметрія напруги, несинусоїдальність, вищі гармоніки, ККД, електромагнітна сумісність.

Постановка проблеми. Упродовж тривалого часу розвиток електроенергетичної галузі в Україні супроводжувався недооцінкою, а іноді й повним ігноруванням проблем, пов'язаних із якістю електричної енергії. Така практика призвела до численних випадків порушення електромагнітної сумісності в мережах, серед споживачів та в самих енергосистемах. Якість електроенергії, як товару, має визначальні споживчі характеристики, що повинні контролюватися не лише енергопостачальними організаціями, а й безпосередньо споживачами та виробниками електротехнічного обладнання.

Одним з найбільш чутливих до параметрів якості електроенергії пристроїв є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, який широко використовується в промисловості. Особливу небезпеку для його ефективної роботи становлять несиметрія напруги між фазами та відхилення форми сигналу від синусоїди - тобто наявність вищих гармонік.

Попри наявність окремих досліджень впливу кожного з цих факторів, питання комплексного аналізу їхнього одночасного впливу на технічні характеристики асинхронного двигуна при різних рівнях навантаження залишається недостатньо вивченим. Відсутність узагальнених математичних моделей, які враховують комбінований вплив несиметрії та гармонічних спотворень, ускладнює оцінку ризиків і прийняття технічно обґрунтованих рішень під час проектування та експлуатації електроприводів.

Таким чином, постає актуальна наукова проблема: визначити закономірності зміни основних технічних параметрів асинхронного двигуна при комплексному впливі несиметрії та несинусоїдальності напруг, а також побудувати аналітичні моделі, що дозволяють прогнозувати ці зміни при різних навантаженнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З розвитком сучасних електротехнічних систем, особливо в умовах стрімкої цифровізації промисловості та побуту, відбувається зростання частки нелінійних електричних навантажень. До таких пристроїв належать тиристорні перетворювачі, імпульсні джерела живлення, системи безперебійного живлення (UPS), частотні перетворювачі, електронні стабілізатори тощо. Ці пристрої, як правило, споживають струм не в чисто синусоїдальній формі, що призводить до появи гармонічних складових у мережі живлення [1].

Як наслідок, напруга, що подається до споживачів, також втрачає синусоїдальний характер. Така гармонічна спотвореність напруги змінює нормальний режим роботи асинхронного електродвигуна - одного з найпоширеніших типів приводів в енергетиці та промисловості. Ці зміни можуть бути неочевидними в короткостроковому періоді, проте в довгостроковій перспективі вони призводять до системного зниження енергоефективності та прискореного зношення електромеханічного обладнання.

У низці наукових праць, зокрема у [2, 3], науковці запропонували методику поетапного аналізу впливу окремих гармонік на роботу електроприводів, яка дозволяє не лише визначити загальний рівень впливу несинусоїдального живлення, а й розрізнити внесок кожної гармонічної складової. Такий підхід надзвичайно важливий у діагностиці, оскільки дає змогу виявити найнебезпечніші частотні складові, які мають найбільший негативний вплив на параметри двигуна.

Зокрема, наявність гармонік у напрузі живлення призводить до суттєвих змін електромагнітного моменту, зростання струмів у фазах, збільшення втрат потужності в сталевому осерді і мідних обмотках, а також до зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД) двигуна. Це, у свою чергу, сприяє перегріву обмоток, деградації ізоляції та скороченню загального ресурсу двигуна.

Особливо небезпечними є гармоніки зі зворотною послідовністю, які створюють в обмотках двигуна магнітне поле, що обертається у зворотному напрямку, і, відповідно, генерує негативний момент. Цей момент протидіє основному робочому моменту двигуна, знижуючи його продуктивність і стабільність. При тривалій дії таких режимів може виникати не лише зниження ефективності, але й виникнення механічних коливань, вібрацій та акустичного шуму. Це особливо важливо при експлуатації двигунів у високоточних або безперервних технологічних процесах, де навіть незначні флуктуації можуть спричинити порушення технологічного режиму або аварійні ситуації [3-5].

Значну наукову цінність становить стаття [6], де автори прагнуть не стільки відтворити окремі ефекти, скільки підвищити загальну достовірність моделювання АД у змінних умовах реальної експлуатації. Запропонований підхід дозволяє адаптувати розроблену в роботі модель АД до параметрів реальної мережі, відображаючи динаміку моменту, втрат і енергоспоживання в залежності від коливань у системі живлення. Це дає змогу використовувати модель не лише для наукових досліджень, але й у практичних задачах техніко-економічного аналізу. Автори [6] справедливо підкреслюють, що навіть незначні спотворення форми напруги можуть у довгостроковій перспективі суттєво вплинути на енергетичну ефективність, ресурс двигуна та витрати на обслуговування.

Ще глибше у природу процесів занурюються автори [7], які не лише враховують наявність спотворень, а й безпосередньо моделюють електромагнітну поведінку асинхронного двигуна в умовах неякісної електроенергії. Їх підхід базується на динамічній моделі, яка дозволяє аналізувати реакцію машини на вплив окремих гармонік, частотних коливань, провалів і перенапруг у режимі реального часу. Унікальність дослідження [7] полягає у тому, що модель пройшла експериментальну верифікацію, отже, її результати не є суто теоретичними, а ґрунтуються на реальних фізичних процесах.

Таким чином, гармонічні складові в системі живлення не лише змінюють параметри самого електропривода, а й мають комплексний негативний вплив на всю механічну частину приводу. З урахуванням зростаючої складності електроенергетичних систем та все більшої насиченості нелінійними навантаженнями, ігнорування цього впливу стає технічно і економічно недоцільним. Це формує об'єктивну потребу у подальшому дослідженні механізмів впливу гармонік, зокрема у поєднанні з іншими факторами - такими як несиметрія напруг, коливання частоти, неякісне заземлення тощо.

Формулювання цілей статті. Мета статті полягає у виявленні впливу параметрів якості електроенергії - несиметрії та несинусоїдальності напруг - на технічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Для її досягнення було розроблено експериментальну установку та проведено вимірювання основних параметрів двигуна (швидкість обертання, момент, ККД, струми) за різних режимів навантаження. Методом Бокса-Уїлсона побудовано регресійні моделі залежностей характеристик двигуна від рівнів несиметрії та гармонік. Дослідження також враховує відповідність стандартам і типові відмінності реакції АД на погіршену якість напруги.

Основна частина. Для комплексної оцінки впливу несиметрії та несинусоїдальності напруг на технічні характеристики АД була створена математична модель та експериментально-дослідна установка (рис. 1).

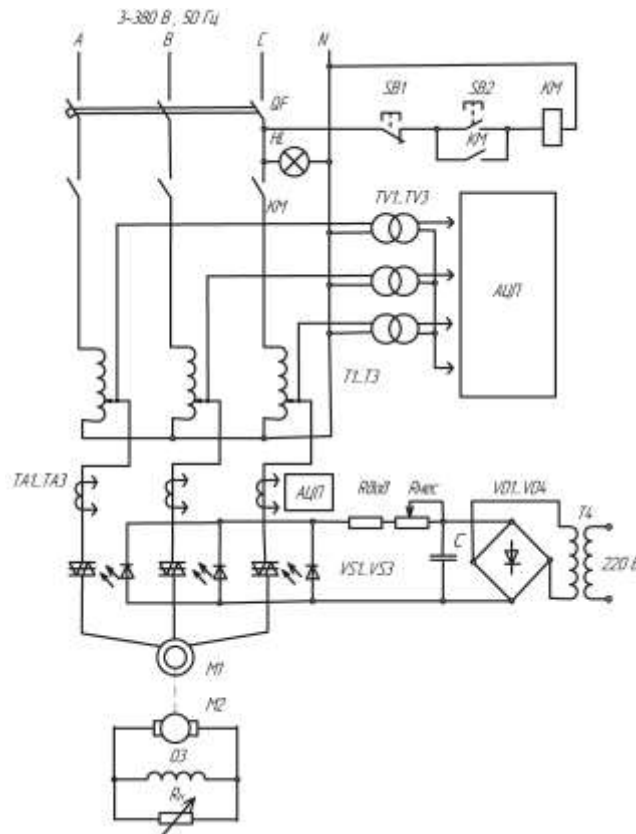


Рис. 1. Електрична принципова схема експериментально-дослідної установки

Технічні характеристики обладнання:

Асинхронний двигун 4AX80A4Y3; $P_{\text{ном}}=1,1$ кВт; $U_{\text{ном}}=380$ В; $I_{\text{ном}}=2,8$ А; $\cos\varphi_{\text{ном}}=0,81$; $n_{\text{ном}}=1400$ об/хв.; $\eta_{\text{ном}}=0,75$.

Генератор ПЗ1; $P_{\text{ном}}=1$ кВт; $U_{\text{ном}}=230$ В; $I_{\text{ном}}=4,35$ А; $n_{\text{ном}}=1450$ об/хв.; $\eta_{\text{ном}}=0,75$.

Живлення експериментальної установки здійснюється від трифазної мережі змінного струму 3×380 В, 50 Гц. Три фази, позначені як А, В, С, підключаються через автоматичний вимикач (QF) до силового кола. Для вмикання і зупинки установки передбачені кнопки SB1 (пуск) та SB2 (стоп), які керують контактором КМ, що забезпечує комутацію живлення до основного навантаження.

У досліджуваній експериментальній установці до трифазної електричної мережі було підключено асинхронний двигун типу М1, який виступає в ролі основного об'єкта спостереження та аналізу. Саме цей двигун приймає на себе всі впливи, зумовлені характеристиками якості живлення, зокрема гармонічними спотвореннями, фазовими дисбалансами та напруговими коливаннями. Його робочі параметри, такі як обертовий момент, споживаний струм, втрати потужності та теплове навантаження, слугують індикаторами оцінки впливу неякісної електроенергії в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації.

Щоб забезпечити варіативність дослідницьких режимів та створити кероване навантаження на валу двигуна, в систему було включено другий електричний агрегат - генератор постійного струму типу М2. Генератор

механічно з'єднаний з валом асинхронного двигуна, і завдяки зміні електричного навантаження на його обмотках збудження можна плавно регулювати механічне навантаження, яке передається на головний двигун. Такий підхід дає змогу досліджувати поведінку АД у широкому діапазоні режимів - від холостого ходу до умов номінального чи навіть перевантаженого стану.

Завдяки такій конфігурації система дозволяє не лише фіксувати робочі параметри двигуна при різних рівнях спотворень мережевої напруги, а й варіювати момент навантаження для вивчення сумарного впливу електромагнітних і механічних чинників. Це надзвичайно важливо для оцінки того, як змінюється поведінка електроприводу при реальних змінних умовах експлуатації, коли навантаження на валу може бути непостійним, а якість енергії - нестабільною. В результаті отримується гнучка і водночас точна експериментальна база для вивчення комплексних впливів на асинхронний двигун у динамічних режимах.

Для контролю напруги та струму в кожній фазі використано трансформатори напруги TV1, TV2, TV3 та трансформатори струму ТА1, ТА2, ТА3, сигнали з яких надходять до аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Таким чином, забезпечується вимірювання параметрів для подальшої обробки та аналізу.

Щоб створити штучну несиметрію напруг, використовуються три лабораторні автотрансформатори Т1–Т3, підключені до кожної фази. Регулювання параметрів несинусоїдальності здійснюється за допомогою оптосимісторів VS1–VS3, які керуються через резистор $R_{нсс}$ і фільтровані випрямленим живленням через діодний міст VD1–VD4, отриманий від трансформатора Т4, що підключений до мережі 220 В.

Також у схемі присутні допоміжні елементи: нагрівальний опір $R_{бал}$ та елемент рекомпенсації $R_{ес}$, що впливають на форму сигналу керування симісторами. Інформація з усіх вимірювальних елементів надходить у комп'ютер через АЦП, що дозволяє фіксувати зміни параметрів при змінних умовах - тобто при зміні коефіцієнтів несиметрії та гармонічного спотворення напруги.

Контролюючими параметрами були: потужність двигуна по фазам, обертовий момент, частота обертання, ККД, струм у фазах.

В результаті дослідів було виявлено, що незначна несиметрія напруг на зниження обертового моменту та на частоту обертання має незначний вплив. У більшій мірі несиметрія впливає на втрати в електродвигуні, нагрівання та скорочення строку служби ізоляції.

Доведено [8-10], що на роботу АД значною мірою впливають вищі гармоніки (ВГ). Так при роботі АД в умовах несинусоїдальної напруги його коефіцієнти потужності і обертовий момент на валу знижуються. Так, якщо амплітуди 5-ої та 7-ої гармонік напруг складуть відповідно 20% і 15% амплітуди 1-ої гармоніки, коефіцієнт потужності двигуна зменшиться до 25% у порівнянні зі значенням його при синусоїдальній напрузі. Якщо

ВГ не перевищують нормально допустимі значення по ГОСТ13109-97, то їх вплив на коефіцієнт потужності та момент можна не враховувати. Вони не перевищують 0,5% моменту, що розвивається при промисловій частоті.

Суттєво ВГ впливають на ізоляцію електричних машин. ВГ активують появу іонізаційних процесів в ізоляції. При цьому розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, які призводять до збільшення діелектричних втрат і скороченню строку служби [5-7].

Дослідження при різних коефіцієнтах завантаження АД дали наступні результати (рис. 2,3,4)

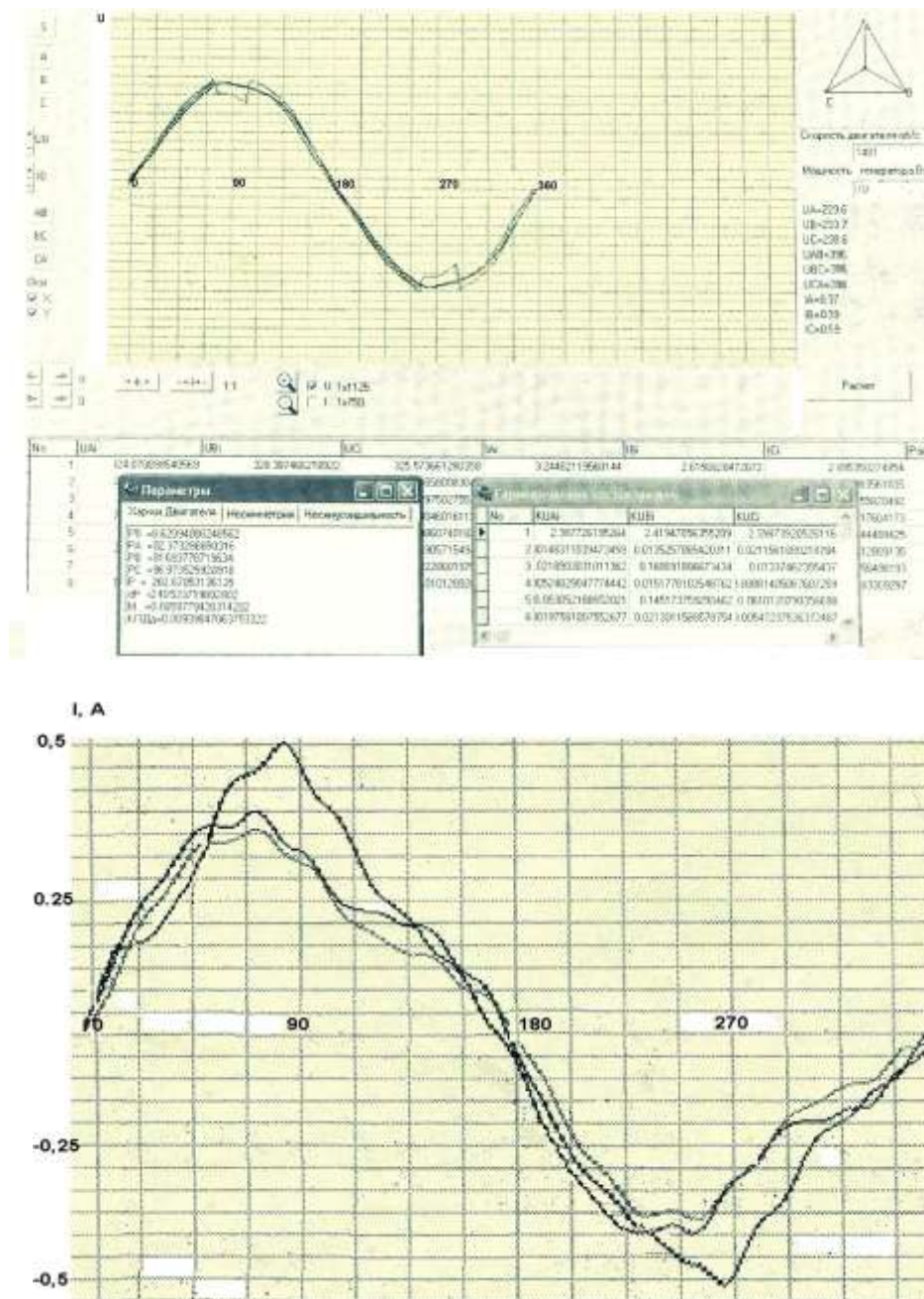
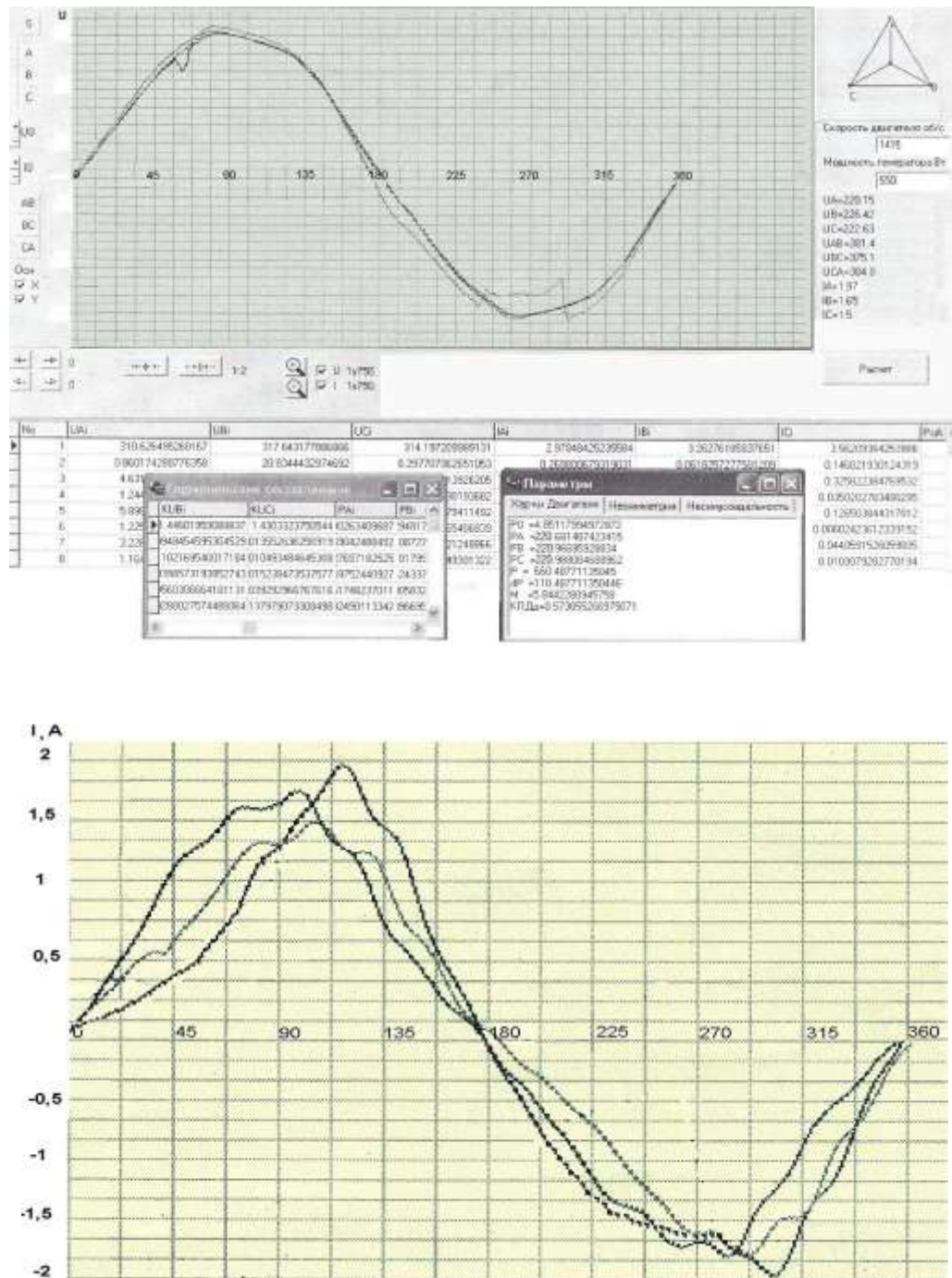


Рис. 2. Результати дослідження АД при різних значеннях несинусоїдальності та несиметрії і коефіцієнті завантаження $K_3=0$.



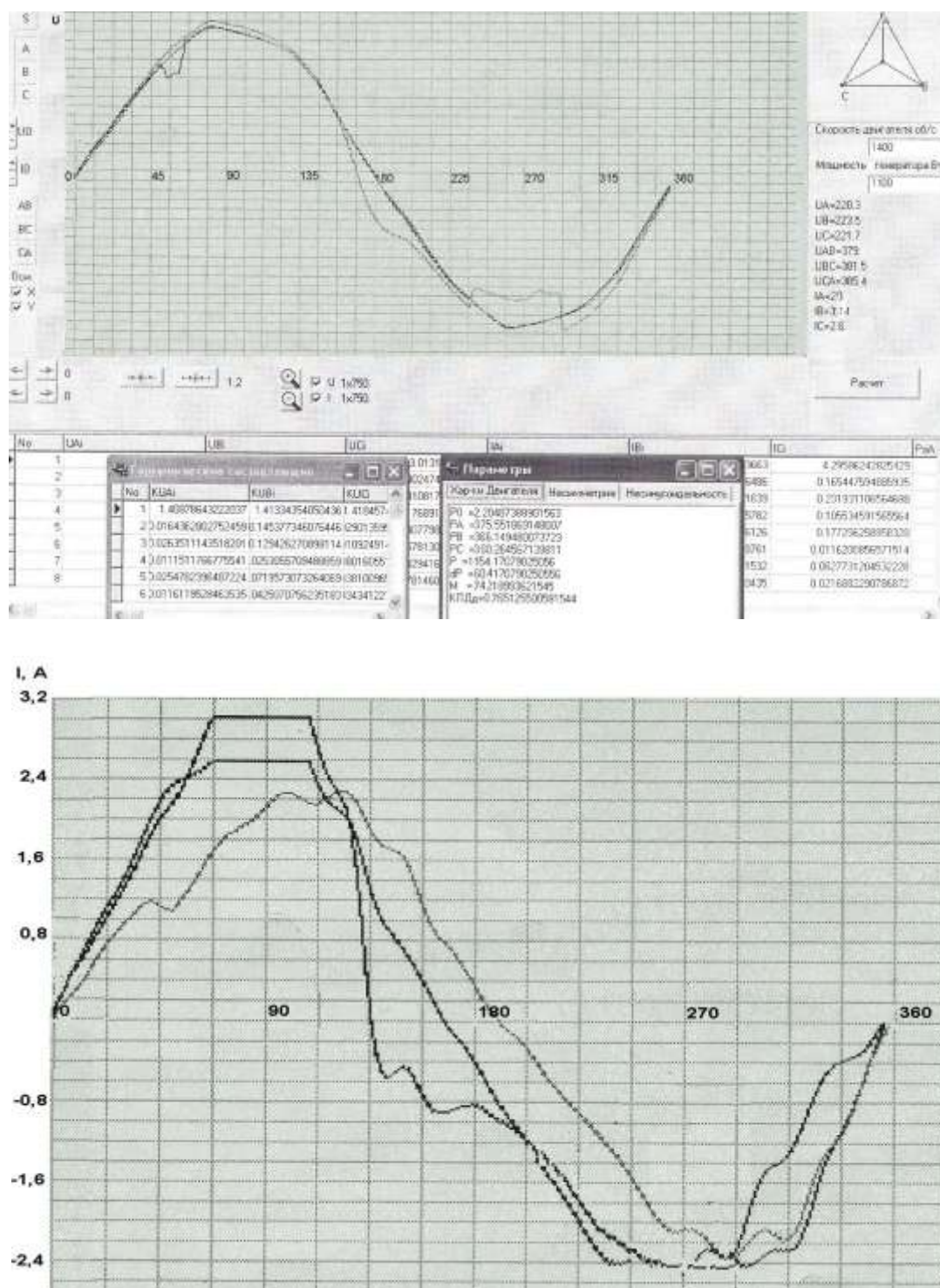


Рис. 4. Результати дослідження АД при різних значеннях несинусоїдальності та несиметрії і коефіцієнті завантаження $K_3=1$.

Аналізуючи отримані графіки, можна скласти електричні рівняння залежностей M , n_2 , $\eta=f(K_{2U}, K_U)$, які є цільовими функціями. Завдяки нелінійному характеру перемагнічування АД коефіцієнти несинусоїдальності по напрузі та струму неоднакові. Для отримання комплексного впливу несиметрії та несинусоїдальності напруг на технічні характеристики АД був поставлений плановий експеримент за методом

Бокса-Уїлсона, який має вигляд $f(x_1, x_2) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2$. Експеримент дав наступні залежності за різних коефіцієнтах завантаження (K_3).

$K_3=0,5$:

$n_2=1415-15,75 K_{2U} - 5,75 K_U + 0,75 K_{2U} K_U$;

$M=5,95-0,0875 K_{2U} - 0,0525 K_U + 0,0125 K_{2U} K_U$;

$\eta=63,8-4,625 K_{2U} - 2,125 K_U + 0,325 K_{2U} K_U$.

$K_3=1$:

$n_2=1400-26,5 K_{2U} - 11,5 K_U + 3,5 K_{2U} K_U$;

$M=7,5-0,2 K_{2U} - 0,06 K_U + 0,015 K_{2U} K_U$;

$\eta=75-5,65 K_{2U} - 3,15 K_U + 0,15 K_{2U} K_U$.

Висновки:

1. Дослідження підтверджує, що технічні характеристики асинхронного двигуна (АД) є чутливими до одночасного впливу кількох показників якості електроенергії - зокрема, несиметрії напруги та несинусоїдальності. Саме їх комбінована дія (а не окремі прояви) має найбільш деструктивний ефект, що відображається у зменшенні ККД, підвищенні ковзання та зниженні моменту.

2. Цільові функції M , n_2 , $\eta=f(K_{2U}, K_U)$ залежать від завантаження АД та його типу і тому не можуть бути уніфікованими. Встановлено, що рівень навантаження АД є критичним чинником, який підсилює вплив гармонічних спотворень. При $K_3 = 1$ відзначено найбільше зниження енергоефективності: до -10% ККД, зменшення моменту на $0,2 \dots 0,3$ Н·м і зростання ковзання понад 30 об/хв. Це підтверджує доцільність врахування робочого режиму при оцінці ефектів показників якості електроенергії.

3. Отримані рівняння демонструють нелінійну (мультиплікативну) форму взаємодії між коефіцієнтом несинусоїдальності напруги та струму. Зокрема, присутність доданку $K_{2U} \cdot K_U$ у всіх регресійних моделях вказує на існування неочевидних компенсаторних або резонансних ефектів, які потребують подальшого дослідження.

4. Серед двох параметрів якості (K_{2U} та K_U), саме K_{2U} (гармонічні спотворення напруги) має більший вплив на ефективність роботи двигуна. Це обґрунтовується фізичною роллю напруги як джерела енергії, а також інерційністю струмових процесів. Це важливо при виборі точок контролю в мережах.

5. Запропоновані рівняння мають прикладну цінність і можуть бути використані для прогнозування технічного стану двигуна при змінних умовах мережі. Зокрема, вони придатні для алгоритмів оцінки залишкового ресурсу АД, оптимізації керування та енергоаудиту.

6. В умовах допустимих гармонік за ГОСТ 13109-97 були виявлені відчутні відхилення ККД і моменту, що ставить під сумнів актуальність існуючих нормативів. Це створює передумови для перегляду граничних

значень параметрів якості електроенергії з урахуванням довготривалого впливу на ресурс і ефективність обладнання.

Література

1. Ніколенко, А., Кузнецов, В., Стьопкін, В., Коваленко, В., Піліпенко, В., & Ровенський, О. Методологічні аспекти моделювання роботи асинхронного електродвигуна в умовах неякісної електроенергії. *Сучасні проблеми моделювання*, 2025. Вип 26, С.268-288.
2. Cuong Ngo Van, Kovernikova Lidiia I. Analysis of the influence of non-sinusoidal and unbalanced network modes on induction motors. *E3S Web of Conferences* 289, 01002. *Energy Systems Research*, 2021. doi.org/10.1051/e3sconf/202128901002.
3. Beleiu, H. G., Maier, V., Pavel, S. G., Birou, I., Pică, C. S., & Dărab, P. C. Harmonics Consequences on Drive Systems with Induction Motor. *Applied Sciences*, 2020. 10(4), 1528. <https://doi.org/10.3390/app10041528>.
4. Tryputen N. et al. About the possibility of researching the optimal automatic control system on a physical model of a thermal object 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, 2019. art. no. 8879830. pp. 1244 - 1248, DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879830
5. Kuznetsov V. et al. Evaluating the effect of electric power quality upon the efficiency of electric power consumption. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, 2019. art. no. 8879841. pp. 556 - 561, DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879841
6. Tryputen M. et al. Improving the Reliability of simulating the operation of an induction motor in solving the technical and economic. *Problem Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1247 AISC, 2021. pp. 143 - 152, DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1_13.
7. Kuznetsova Ye. et al. Development and verification of dynamic electromagnetic model of asynchronous motor operating in terms of poor-quality electric power. *Proceedings of the international conference on modern electrical and energy systems, MEES 2019*, 2019. art. no. 8896598. pp. 350 - 353, DOI: 10.1109/MEES.2019.8896598
8. Tryputen M., Kuznetsov V., Nikolenko A. Enhancing power quality within the context of industrial enterprises: strategies for improvement. *European Science*, 2023. №. sge25-01. pp. 72-95.
9. Modeling of structural elements of the energy-economic model «Electric network - electric consumer» [Text] : Monograph / M. Tryputen, V. Kuznetsov, V. Kovalenko, V. Artemchuk, S. Levchenko. Karlsruhe, 2024. 138 p.
10. Tryputen M., Kuznetsov V., Kovzel M., Kovalenko V., Artemchuk V., Nadtochyi V. Minimization of the description of images in the problem of adaptive control of static technological objects. *Proceedings of the 20th IEEE*

ANALYSIS OF THE COMBINED INFLUENCE OF POWER QUALITY PARAMETERS ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AN INDUCTION MOTOR

Kovalenko Viktor, Kachura Oleksii, Vasyl Sprysa, Gulesha Olena,
Triukilo Alik, Kopysov Vladyslav, Bashko Volodymyr,

This paper presents the results of experimental and theoretical studies on the combined influence of power quality parameters—voltage unbalance and waveform distortion—on the performance characteristics of an induction motor (IM) with a squirrel-cage rotor. The study is highly relevant in the context of modern power systems, where power quality issues are often underestimated, leading to violations of electromagnetic compatibility (EMC) within electrical networks.

To achieve the research objectives, a dedicated experimental setup was developed, allowing artificial variation of voltage symmetry and harmonic content. The analysis was performed under various motor loading conditions (load factor $K_z = 0; 0.5; 1$). The parameters measured included: phase power, torque, rotational speed, efficiency (η), and phase currents. The Box-Wilson method was applied to construct regression models describing the dependence of the main IM characteristics (speed n_2 , torque M , and efficiency η) on the voltage unbalance coefficient (K_{2U}) and the total harmonic distortion coefficient (K_U).

The results showed that even slight unbalance can significantly impact motor heating and insulation lifespan. The presence of higher-order harmonics, particularly the 5th and 7th, reduces the power factor by up to 25% compared to sinusoidal operation. Exceeding the allowable levels of harmonic distortion, as specified by GOST 13109-97, leads to a risk of insulation ionization and degradation. However, within the standard limits, harmonics have a negligible effect on the mechanical parameters of the motor.

The study also revealed that motor characteristics cannot be universally standardized across different types of induction machines, as they depend on both the motor design and loading conditions. This underscores the need for a comprehensive approach to power quality analysis that considers the cumulative effects of multiple factors.

Keywords: induction motor, power quality, voltage unbalance, waveform distortion, higher-order harmonics, efficiency, electromagnetic compatibility.

References

1. Nikolenko, A., Kuznetsov, V., Stiopkin, V., Kovalenko, V., Pilipenko, V., & Rovenskyi, O. (2025). Methodological aspects of modeling the operation of an induction motor under poor power quality conditions. *Modern Problems of Modeling*, (26), 268–288. [in Ukrainian]
2. Cuong Ngo Van, Kovernikova Lidiia I. (2021). Analysis of the influence of non-sinusoidal and unbalanced network modes on induction motors. *E3S Web of Conferences* 289, 01002 *Energy Systems Research*. doi.org/10.1051/e3sconf/202128901002.
3. Beleiu, H. G., Maier, V., Pavel, S. G., Birou, I., Pică, C. S., & Dărab, P. C. (2020). Harmonics Consequences on Drive Systems with Induction Motor. *Applied Sciences*, 10(4), 1528. <https://doi.org/10.3390/app10041528>.
4. Tryputen N. et al. (2019). About the possibility of researching the optimal automatic control system on a physical model of a thermal object. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019*. Proceedings, art. no. 8879830, 1244 - 1248, DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879830.
5. Kuznetsov V. et al. (2019). Evaluating the effect of electric power quality upon the efficiency of electric power consumption *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019* Proceedings, art. no. 8879841, 556 - 561, DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879841
6. Tryputen M. et al. (2021). Improving the Reliability of Simulating the Operation of an Induction Motor in Solving the Technical and Economic Problem. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1247 AISC, 143 - 152, DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1_13
7. Kuznetsova Ye. et al. (2019). Development and Verification of Dynamic Electromagnetic Model of Asynchronous Motor Operating in Terms of Poor-Quality Electric Power *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019*, art. no. 8896598, 350 - 353, DOI: 10.1109/MEES.2019.8896598.
8. Tryputen M., Kuznetsov V., Nikolenko A. (2023) Enhancing power quality within the context of industrial enterprises: strategies for improvement. *European Science*. №. sge25-01. pp. 72-95.
9. M. Tryputen, V. Kuznetsov, V. Kovalenko, V. Artemchuk, S. Levchenko. (2024) Modeling of structural elements of the energy-economic model «Electric network - electric consumer» [Text]: Monograph Karlsruhe, 138p.
10. Tryputen M., Kuznetsov V., Kovzel M., Kovalenko V., Artemchuk V., Nadtochy V. (2021) Minimization of the Description of Images in the Problem of Adaptive Control of Static Technological Objects *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021*, DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598651