

УДК 004.942

МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Ніколенко А.В., канд. техн. наук,

nikolenko.a.v.nmetau@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3808-4249

Кузнецов В.В., канд. техн. наук,

witjane20002014@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8169-4598

Стьопкін В.В., канд. техн. наук,

vasilstopkin@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5727-8343

Український державний університет науки і технологій (Україна)

Коваленко В.Л., д-р. техн. наук,

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

Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету (Україна)

Піліпенко В. О.,

pilipenko992@gmail.com, ORCID: 0009-0004-7301-2501

Playtika Holding Corp (Дніпро, Україна)

Ровенський О. О.,

rovenskyioleg7@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0628-5188

Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету (Україна)

У статті розглянуто методологічні підходи до моделювання роботи асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в умовах неякісної електроенергії. Актуальність дослідження обумовлена високою часткою електродвигунів у глобальному енергоспоживанні, що становить до 46%, а також негативними наслідками зниження якості електропостачання для ефективності, надійності та ресурсу електромеханічних систем. Наведено аналіз сучасного стану математичного моделювання асинхронних двигунів, зокрема, підкреслено, що переважна більшість існуючих моделей базується на припущенні симетричності та синусоїдальності напруги живлення, що не відповідає умовам реального промислового середовища.

Досліджено різні класи математичних моделей, які частково враховують окремі показники якості електроенергії, зокрема несиметрію, гармонічні спотворення тощо. Показано, що моделі, орієнтовані на аналіз окремих чинників, не здатні забезпечити комплексну оцінку енергетичної ефективності двигуна. У статті сформульовано вимоги до універсальної імітаційної моделі асинхронного двигуна, здатної враховувати всі основні показники якості електроенергії (ПКЕ) одночасно, як в усталених, так і в перехідних режимах роботи.

Запропоновано концепцію побудови моделі, яка базується на поєднанні обчислювальних блоків, запозичених із відомих математичних аналогів, що дозволяє враховувати вплив несиметрії та несинусоїдальності напруги живлення, а також виконувати розрахунок миттєвих значень струмів, втрат у сталі та міді, електромагнітного моменту, ККД та коефіцієнта потужності. У моделі передбачена можливість розширення з урахуванням фільтрації гармонік і змінних частот мережі, з подальшим уточненням параметрів шляхом експериментальної ідентифікації.

Зроблено висновок про відсутність єдиної універсальної моделі асинхронного двигуна, яка враховує всі ПКЕ, та обґрунтовано доцільність створення імітаційної моделі нового типу як ефективного інструменту для аналізу режимів роботи електродвигуна в умовах реальної електромережі.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, математичне моделювання, якість електроенергії, симетрія, несинусоїдальність, енергоефективність, імітаційна модель, електромеханічний перетворювач.

Постановка проблеми. В умовах сьогодення асинхронні двигуни є основними перетворювачами електричної енергії в механічну і становлять основу приводу більшості різноманітних механізмів. Таке становище вони здобули завдяки вдалому поєднанню комплексу експлуатаційних і конструктивних характеристик – здатності автоматично змінювати обертовий момент відповідно до зміни моменту опору на валу, високому коефіцієнту корисної дії, а також простоті конструкції та досить низькій собівартості виготовлення у порівнянні з іншими електромеханічними перетворювачами [1]. І при цьому вони є найбільшими споживачами електроенергії. За оцінками, на системи з електродвигунами припадає від 43% до 46% загального світового споживання електроенергії, Без комплексної та ефективної політики у сфері енергоефективності, до 2030 року споживання енергії електродвигунами може зрости до 13 360 ТВт·год на рік. Наразі кінцеві споживачі витрачають близько 565 мільярдів доларів США щороку на електроенергію для електродвигунів, а до до 2030 року ця сума може зрости майже до 900 мільярдів доларів [2].

Сучасний електропривод, що реалізує процеси електромеханічного перетворення енергії і в основному базується на використанні асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором як приводних пристроїв, конструктивно не є складним. Водночас експлуатація цього класу двигунів на сьогодні пов'язана з низкою проблем. Основною з них є живлення асинхронних двигунів неякісною електроенергією. Достеменно відомо, що навіть незначні відхилення якості напруги живлення призводять до негативних наслідків, пов'язаних зі старінням ізоляції та зниженням таких енергетичних показників роботи асинхронних двигунів, як коефіцієнт

корисної дії та коефіцієнт потужності [3]. Від якості електроживлення суттєво залежить їх надійність, ефективність та термін експлуатації [4]. Тому однією з актуальних проблем, яка суттєво впливає на функціонування асинхронних двигунів, є погіршення якості електроенергії якою живляться останні – наявність несиметрії, несинусоїдальності, нестабільності частоти та інших відхилень від нормованих значень [5, 6, 7].

Існуючі математичні моделі асинхронних двигунів, як правило, будуються з припущенням симетричності та синусоїдальності напруги живлення [8], що робить їх недостатньо точними для аналізу в умовах реального електроживлення. Більш складні моделі, які враховують окремі показники якості електроенергії, придатні лише для обмежених випадків (статичні режими роботи, фіксована частота мережі), або вимагають надмірно складних обчислень. На теперішній час відсутня єдина універсальна модель, яка здатна одночасно враховувати всі показники якості електроенергії та забезпечувати адекватну оцінку енергетичної ефективності асинхронного двигуна в будь-яких режимах його роботи.

Таким чином, існує потреба у створенні комплексної математичної моделі, яка б дозволяла коректно моделювати роботу асинхронного двигуна за будь-якого типу викривлень напруги живлення та забезпечувала розрахунок основних техніко – економічних показників роботи електромеханічного перетворювача. Така модель є необхідною для проведення достовірного аналізу, діагностики, прогнозування ресурсу та оптимізації роботи електричних машин в умовах реальної енергомережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделювання електромеханічних систем дає змогу на передпроектному етапі оцінити процеси, що в них відбуваються. На основі цих даних можна скоригувати параметри силових установок і їх систем керування, а також перевірити відповідність обраного обладнання режимам роботи. Математичні аналоги асинхронних двигунів широко використовуються для оцінки ефективності законів керування, дослідження електромагнітних процесів і прогнозування енергетичних показників їх роботи. Проте ситуація ускладнюється, коли під час моделювання необхідно враховувати показники якості електроенергії, такі як несиметрія й несинусоїдальність електричних величин. Проблема полягає в тому, що через прийняті в таких випадках припущення сама модель асинхронного двигуна часто стає неадекватною. Якщо ж використовуються більш складні моделі, опис процесів настільки ускладнюється, що пошук необхідних залежностей стає занадто складним.

Водночас припущення про симетрію та синусоїдальність напруги живлення сьогодні є фактично необґрунтованим, оскільки якість електроенергії в цехах промислових підприємств практично завжди не відповідає необхідним вимогам [3]. Розв'язання цієї проблеми неможливе без наявності єдиної математичної моделі, яка дозволяла б аналізувати енергетичну ефективність асинхронного двигуна з короткозамкненим

ротатором в усталених режимах при різних значеннях усіх показників якості електроенергії в мережі.

Синтезом математичних моделей асинхронного двигуна займалися такі відомі українські вчені, як Родькін Д. Й., Чорний О. П., Саєнко Ю.Л. та інші, а також закордонні дослідники Pedra J., R. Krishnan, J. L. Kirtley, S. J. Chapman, M. R. Hachicha, M. H. Gmiden. Так наприклад, дослідження авторів [9,10] присвячені аналізу роботи електромеханічного перетворювача за умови симетричності й синусоїдальної форми напруги на входах АД. У роботах [11, 12] проводиться ідентифікація параметрів електричної машини з метою оцінки її ресурсу. Дослідження [13–15] пов'язані з аналізом способів керування АД.

Як відомо [16], гармонічні спотворення напруги живлення виникають внаслідок роботи тиристорних перетворювачів, імпульсних джерел та інших нелінійних навантажень і призводять до несинусоїдності напруги та струмів в обмотках двигуна. В роботі [17] авторами запропоновано методику оцінки наслідків кожної гармоніки окремо для загальної оцінки впливу несинусоїдного живлення на систему електропривода з асинхронним двигуном. Показано, що наявність напруги з гармонійними складовими на статорі призводить до суттєвих змін як електромагнітних параметрів самого двигуна (момент, струми, втрати тощо), так і впливає на механічну частину приводу. Авторами роботи [17] зроблено висновки, що робота електродвигунів у системі з гармонічними спотвореннями призводить до зниження ефективності машин і скорочення терміну їх служби через збільшення втрат у сталі та міді. Крім того, гармоніки напруги та струму можуть впливати на момент, який розвиває двигун. Наявність гармонійних складових в обертових машинах також можуть спричиняти вібрації та шуми. Так, гармоніки зі зворотною послідовністю створюють негативний момент, який протидіє основному моменту двигуна, що, своєю чергою, знижує загальну ефективність роботи двигуна. Непарні гармоніки створюють в двигуні обертове магнітне поле зворотного напрямку (так звану негативну послідовність), що генерує негативний момент і додатково зменшує корисний вихідний момент АД.

Автором [18] розроблено динамічну модель АД, яка описує роботу останнього при живленні від шестиступеневого інвертора напруги (VSI). Особливістю цієї моделі є її здатність враховувати вплив непарних гармонік (5-ї, 7-ї, 11-ї), що виникають унаслідок роботи інвертора, а також різноманітні фізичні ефекти, такі як скин-ефект, насичення магнітного осердя, втрати в сталі та паразитні навантаження. Проведено перевірку адекватності розробленої моделі, шляхом порівняння результатів моделювання та результатів експериментальних даних при різних типах живлення: інверторному та синусоїдальному. Виявилося, що інверторне живлення суттєво знижує ефективність роботи двигуна — приблизно на 3%, а також призводить до зростання загальних втрат на 20%. Однією з основних переваг запропонованої моделі є її висока точність, адже вона

враховує усі ключові нелінійні ефекти, які виникають в електричних машинах. Вона може бути використана для глибокого аналізу гармонік, дозволяє прогнозувати втрати енергії, визначати зниження коефіцієнта потужності та рівень перегріву обмоток. Водночас модель має й недоліки: по-перше, вона є складною у реалізації, оскільки потребує великого обсягу точних даних про параметри двигуна, включаючи геометричні характеристики та експериментальні вимірювання; по-друге, обчислювальне навантаження моделі є досить значним, особливо при врахуванні високочастотних гармонік, також певною мірою модель ідеалізує поведінку інвертора, не враховуючи усіх можливих нелінійностей напівпровідникових ключів.

Сучасні дослідження [19, 20], також шукають шляхів зменшення впливу гармонік – наприклад, шляхом фільтрації або оптимізації керування перетворювачами – але це виходить за межі даного огляду.

Стаття автора [21] досліджує взаємозв'язок між зміною напруги живлення та робочими характеристиками асинхронних електродвигунів, зокрема вплив на крутний момент, струм, коефіцієнт потужності, температуру нагрівання та ефективність роботи. Автор дійшов до висновків, що відхилення напруги суттєво впливають на надійність і продуктивність електродвигунів. Для забезпечення стабільної роботи та подовження строку служби двигунів необхідно підтримувати системну напругу максимально близько до номінальної [21]. Окремим випадком є несиметрія напруги живлення АД, коли вона присутня лише в одній фазі мережі, який досліджено в [22]. Дослідниками було проведено моделювання, коли напруга в одній фазі була на 10% і 20% вище номінального значення, тоді як напруга двох інших фаз відповідала номінальній. Проведені дослідження на синтезованій моделі [22] показали, що навіть незначне перевищення напруги в одній фазі (на 10–20%) суттєво впливає на роботу трифазного асинхронного двигуна - зростає нагрів обмоток, знижується ефективність показників, що може призвести до передчасного виходу з ладу АД.

Інші автори [23, 24] відзначають, що короточасні перенапруги, спричинені комутаційними процесами, можуть призводити до пробою ізоляції двигуна. Отримані результати моделювання [24] підтверджують, що перенапруги скорочують термін служби ізоляції та можуть викликати передчасні пробої міжвиткової ізоляції. Практичні рекомендації передбачають використання пристроїв захисту від перенапруг (обмежувачів перенапруг, варисторів тощо) та підтримання напруги в межах допуску, оскільки перевищення на 10% і більше повинно розглядатися як аварійний режим.

Вплив провалів напруги на асинхронні двигуни був детально досліджений як моделюванням, так і експериментально [24]. Загальний ефект полягає в тому, що під час провалу електромагнітний момент двигуна різко зменшується через пропорційне зниження напруги, що може

призвести до сповільнення або навіть зупинки двигуна, якщо провал глибокий або тривалий. Після відновлення напруги двигун споживає великий кидковий струм і відновлює оберти з кидком моменту, подібно до пускового режиму. Згідно з дослідженнями, провал напруги викликає величезні ударні струми та імпульси моменту в АД, що створює механічні навантаження на вал та електродинамічні навантаження на обмотки [24].

Характер впливу залежить від глибини провалу (залишкового рівня напруги) та його тривалості. В роботі [25] показано, що індуктивний характер АД дозволяє дещо підтримувати напругу на своїх виводах під час короткого замикання в мережі (за рахунок розрядки електромагнітної енергії), тобто двигун “підпирає” напругу, зменшуючи глибину провалу, але водночас продовжує його тривалість. Іншими словами, при коротких замиканнях на шині система з АД матиме менш глибокий, але більш довгий провал, ніж система з пасивним навантаженням. З точки зору самого двигуна, чим більша потужність АД, тим довше він потім відновлює швидкість після усунення провалу – експериментально доведено [25], що двигунам великої потужності потрібно сотні мілісекунд для повернення до номінальних обертів після відновлення напруги.

Дослідження проведені на моделі в [26] підтверджують критичну залежність наслідків від глибини провалу. Змодельовані симетричні провали напруги різної величини, підтверджують, що зі збільшенням глибини провалу пікові значення струму в обмотках і електромагнітного моменту при відновленні напруги зростають, а частота обертання двигуна падає. Для точнішого відтворення перехідних процесів, пов’язаних із провалами напруги, пропонуються удосконалені моделі [27]. Так в [27], авторами розроблено спрощену електромагнітну модель АД 3-го порядку, яка точно враховує поведінку потокозчеплення і моменту під час провалу напруги. Ця модель дозволяє розрахувати динаміку двигуна при просадках напруги з меншою обчислювальною складністю, що корисно для оцінки стійкості електроприводів та налаштування пристроїв захисту.

На підставі проведеного аналізу можна припустити, що єдиної моделі, яка дозволяє оцінити енергетичну ефективність електричної машини, що працює в умовах неякісного живлення, тобто такої, що враховує всі показники якості електроенергії (ПКЕ) одночасно, наразі не існує.

Сформулюємо вимоги до вигляду, функціональності, характеристик і складу вхідних величин, яким повинна відповідати модель асинхронного двигуна:

1. Модель АД повинна бути працездатною при довільній формі напруги на статорі, включаючи несинусоїдальність і несиметрію. Ця вимога є необхідною для більшості математичних аналогів двигунів, що нині застосовуються.

2. Розроблювана модель повинна бути адекватною як в усталених, так і в перехідних режимах, пов’язаних зі зміною навантаження, якості

електроенергії, керуючих впливів.

3. Синтезований аналог АД повинен мати можливість підключення модулів фільтрів зі сторони входу електродвигуна і при цьому дозволяти визначити залежність результуючої форми напруги «після фільтрів» від споживаного АД струму.

4. Вихідними параметрами моделі повинні бути:

- миттєві значення струмів статора і ротора асинхронного електродвигуна, їх спектр;
- активна (P), реактивна (Q) і повна (S) потужності, включаючи ту їх частку, що пов'язана зі спотвореннями напруги зі сторони статора, які відповідають реальним показникам якості електроенергії;
- коефіцієнт корисної дії (ККД, η %) і коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$);
- складові окремих втрат у двигуні: втрати в міді статора (ΔP_{m1}), ротора (ΔP_{m2}) і сталі (ΔP_c);
- швидкість обертання (ω) і електромагнітний момент (M) двигуна залежно від навантаження на валу, включаючи їх спектральні характеристики.

Таким чином, розроблювана модель повинна надавати повний обсяг даних, необхідних для дослідження режимів роботи асинхронного електродвигуна, що функціонує в умовах неякісної електроенергії, з метою оцінки електромагнітної складової економічних втрат, що при цьому виникають.

Формулювання цілей статті. Метою цієї роботи є аналіз можливості використання існуючих математичних аналогів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором для реалізації математичної моделі, що відповідає вищезазначеним вимогам, або створення на їх основі єдиної математичної моделі асинхронного двигуна, яка дозволяє прогнозувати його енергетичні показники при зміні всіх показників якості живильної напруги в мережі одночасно.

Основним завданням цього дослідження є аналіз розроблених аналогів АД з метою виявлення в них обчислювальних блоків, поєднання яких дозволить врахувати всі показники якості електроенергії одночасно.

Основна частина. Існує два підходи до моделювання електромеханічного перетворювача енергії: на основі теорії поля та теорії електричних кіл, які базуються відповідно на рівняннях Максвелла та Кірхгофа. Проте найбільш прогресивним на сьогодні є метод аналізу процесів у зазначеному перетворювачі енергії [28], що ґрунтується на поєднанні обох підходів і об'єднує в собі обидві згадані теорії. При цьому, виходячи з картини поля у повітряному зазорі електричної машини, складаються рівняння для напруг, а вже далі через струми або потокозчеплення записуються рівняння для електромагнітного моменту.

На сьогодні існують досить повні математичні моделі асинхронних електродвигунів. Їх поведінку в різних умовах експлуатації розглянуто в уже класичних дослідженнях [28, 29], однак питання моделювання роботи

АД при їх живленні неякісною електроенергією так і залишилося невирішеним.

Найбільш поширений математичний аналог моделі асинхронного електромеханічного перетворювача енергії наведений у роботі [28].

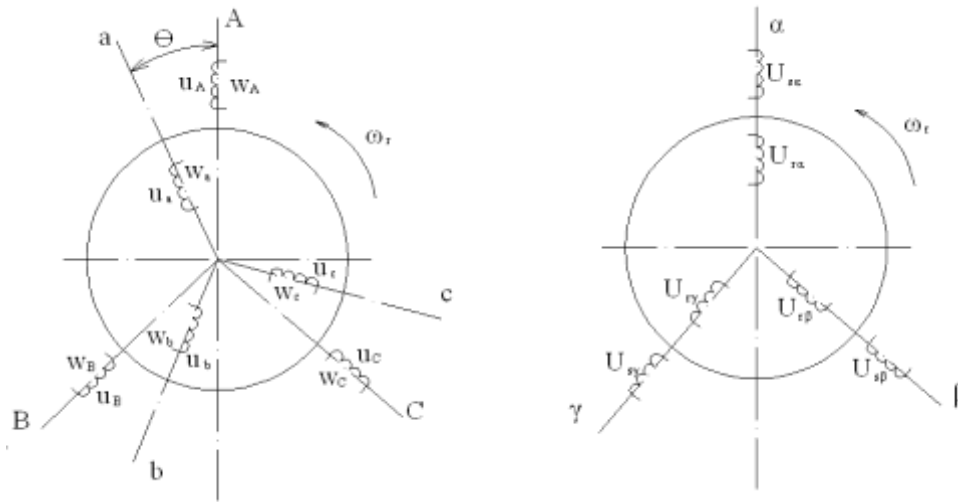


Рис. 1. Просторові моделі трифазної ідеалізованої асинхронної машини з неперетвореною (а) та загальмованою (б) системами координат

Він являє собою просторову модель трифазної ідеалізованої машини (рис. 1а), побудовану на низці припущень: машина є двополусною, має гладкий повітряний зазор, усі її параметри лінійні, а напруга живлення синусоїдальна. На рисунку зображено по три обмотки статора і ротора з кількістю витків w_A, w_B, w_C и w_a, w_b, w_c відповідно, зміщених на 120° . У неперетвореній системі координат під час переміщення обмоток взаємні індуктивності між ними змінюються, а похідна кута між осями статора і ротора за часом дає кутову швидкість ротора- $(d\theta/dt)=\omega_r$.

Для розглядуваної машини в неперетвореній системі координат A, B, C, a, b, c справедлива система диференціальних рівнянь такого вигляду [28]:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= \frac{d\Psi_A}{dt} + i_A R_A; u_B = \frac{d\Psi_B}{dt} + i_B R_B; \\ u_C &= \frac{d\Psi_C}{dt} + i_C R_C; u_a = \frac{d\Psi_a}{dt} + i_a R_a; \\ u_b &= \frac{d\Psi_b}{dt} + i_b R_b; u_c = \frac{d\Psi_c}{dt} + i_c R_c; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$M_c + J \frac{d\omega_r}{dt} = M_e,$$

де R - активні опори обмоток фаз статора і ротора; Ψ - результуючі потокозчеплення цих обмоток. Тут потокозчеплення однієї, наприклад фази A , залежить від струмів інших фаз статора і ротора:

$$\Psi_A = i_A L_A + i_B M_{AB} + i_C M_{AC} + i_a M_{Aa} + i_b M_{Ab} + i_c M_{Ac} \quad (2)$$

За аналогією записуються потокозчеплення для п'яти інших контурів.

У даній системі координат індуктивності (L) та взаємні індуктивності (M) в рівняннях для потокозчеплення є періодичними коефіцієнтами, що змінюються за гармонічним законом під час обертання ротора машини. Для усунення цього здійснюється перехід до так званої загальмованої системи координат, де кругове поле в повітряному зазорі подається як результуючі вектори.

Просторова модель трифазної ідеалізованої машини в загальмованій трифазній системі координат представлена на рис. 1б. Рівняння, що відповідають даній моделі в координатах α , β , γ , нерухомих відносно статора, мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} u_{sa} &= \frac{d\Psi_{sa}}{dt} + i_{sa}r_{sa}; \\ u_{s\beta} &= \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} + i_{s\beta}r_{s\beta}; \\ u_{s\gamma} &= \frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt} + i_{s\gamma}r_{s\gamma}; \\ u_{ra} &= \frac{d\Psi_{ra}}{dt} + i_{ra}r_{ra} + \omega_r \frac{(-\Psi_{r\gamma} + \Psi_{r\beta})}{\sqrt{3}}; \\ u_{r\beta} &= \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + i_{r\beta}r_{r\beta} + \omega_r \frac{(-\Psi_{ra} + \Psi_{r\gamma})}{\sqrt{3}}; \\ u_{r\gamma} &= \frac{d\Psi_{r\gamma}}{dt} + i_{r\gamma}r_{r\gamma} + \omega_r \frac{(-\Psi_{r\beta} + \Psi_{ra})}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Тут потокозчеплення:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{sa} &= i_{sa}L_{sa} - 0.5Mi_{s\beta} - 0.5Mi_{s\gamma} + (i_{ra} - 0.5i_{r\beta} - 0.5i_{r\gamma})M; \\ \Psi_{s\beta} &= i_{s\beta}L_{s\beta} - 0.5Mi_{s\gamma} - 0.5Mi_{sa} + (i_{r\beta} - 0.5i_{ra} - 0.5i_{r\gamma})M; \\ \Psi_{s\gamma} &= i_{s\gamma}L_{s\gamma} - 0.5Mi_{sa} - 0.5Mi_{s\beta} + (i_{r\gamma} - 0.5i_{ra} - 0.5i_{r\beta})M; \\ \Psi_{ra} &= i_{ra}L_{ra} - 0.5Mi_{r\beta} - 0.5Mi_{r\gamma} + (i_{sa} - 0.5i_{s\beta} - 0.5i_{s\gamma})M; \\ \Psi_{r\beta} &= i_{r\beta}L_{r\beta} - 0.5Mi_{r\gamma} - 0.5Mi_{ra} + (i_{s\beta} - 0.5i_{sa} - 0.5i_{s\gamma})M; \\ \Psi_{r\gamma} &= i_{r\gamma}L_{r\gamma} - 0.5Mi_{ra} - 0.5Mi_{r\beta} + (i_{s\gamma} - 0.5i_{sa} - 0.5i_{s\beta})M. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При цьому електромагнітна енергія, зосереджена в повітряному зазорі:

$$We = 0.5 \sum_{k=1}^n \psi_k \times i_k, \quad (5)$$

а електромагнітний момент

$$M_e = \frac{\sqrt{3}}{2} pM(i_{ry}i_{sa} + i_{ra}i_{sy} + i_{r\beta}i_{s\gamma} - i_{r\beta}i_{sa} - i_{ry}i_{s\beta} - i_{ra}i_{s\gamma}). \quad (6)$$

де $i=1, n$ – кількість обмоток машини.

Дана система складається з чотирнадцяти рівнянь, у яких залежними змінними є по шість струмів і потокозчеплень, електромагнітний момент та кутова швидкість обертання. Система в загальному випадку є нелінійною. Дану модель, як зазначено у [28], доцільно застосовувати для дослідження асинхронної електричної машини в динамічному режимі при синусоїдальній напрузі живлення. Для аналізу ж усталеного режиму, як граничного випадку динамічного, рівняння для напруг можуть бути отримані з вихідних рівнянь електромеханічного перетворення шляхом заміни оператора диференціювання $d(\)/dt$ на $j\omega$.

Недоліком такої моделі є те, що вона розрахована лише на живлення асинхронного двигуна від симетричної системи синусоїдальної напруги. У разі несиметрії напруг з'являється необхідність розкласти їх на пряму, зворотну та нульову послідовності, а момент на валу розглядати як суму моментів від кожної з цих послідовностей. Таким чином, для аналізу роботи асинхронного двигуна в умовах неякісного електроживлення необхідне суттєве ускладнення вихідної моделі.

Ряд досліджень [30–32] присвячених питанням математичного моделювання електричних машин з метою визначення впливу конструктивної несиметрії асинхронного двигуна на його електромагнітні параметри. Такі моделі, як зазначають автори, доцільно використовувати під час проєктування і виготовлення серійних асинхронних машин, а також у дослідженнях, пов'язаних із визначенням ресурсу електричної машини. Однак ці математичні аналоги не цілком відповідають умовам поставленої задачі дослідження.

В роботах [33–41] розглядаються проблеми, пов'язані з нелінійністю параметрів електромеханічного перетворювача, що в підсумку сприяє ідентифікації останніх та визначенню ресурсу самої машини. Як зазначають автори, використані ними моделі придатні для електричних машин, які пройшли ремонт і перебувають в умовах інтенсивної експлуатації. Водночас вони не становлять особливого інтересу через невідповідність завданню дослідження.

У роботах [42, 43] проведено аналіз енергетичних перетворень в електромеханічних системах. Проаналізовано можливості зниження втрат в асинхронному двигуні шляхом застосування спеціальних пристроїв, які дають змогу покращити якість перетворення енергії безпосередньо в двигуні. Зазначені дослідження також не відповідають меті, поставленій у даній роботі.

Інтерес становлять роботи [44–46], у яких автором запропонована математична модель, що описує асинхронний двигун з короткозамкненим ротором як об'єкт регулювання. Проте і ця модель побудована з припущенням, що електричні параметри машини симетричні, а напруга на

її входах має синусоїдальну форму. Зазначений математичний аналог дає змогу виконати лише частковий аналіз втрат в електромеханічному перетворювачі.

Особливої уваги в нашому випадку заслуговує математична модель електромеханічного перетворювача, що працює в умовах несиметрії первинних напруг, розглянута в [47], де автором застосовано метод симетричних складових. Система несиметричних первинних напруг статора ($\underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1}$) подається як сума складових прямої ($\underline{U}_{A11}, \underline{U}_{B11}, \underline{U}_{C11}$) та зворотної ($\underline{U}_{A12}, \underline{U}_{B12}, \underline{U}_{C12}$) послідовностей. При цьому складові нульової послідовності не розглядаються, оскільки передбачається, що обмотки двигуна з'єднані за схемою "зірка", і, таким чином, відсутній контур для проходження в них струмів даної послідовності. Обчислення зазначених складових виконується за відомими залежностями:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{A11} = \underline{U}_{11} &= \frac{(\underline{U}_{A1} + a\underline{U}_{B1} + a^2\underline{U}_{C1})}{3}, \\ \underline{U}_{A12} = \underline{U}_{12} &= \frac{(\underline{U}_{A1} + a^2\underline{U}_{B1} + a\underline{U}_{C1})}{3},\end{aligned}\quad (7)$$

де $a = e^{j2\pi/3}$. При цьому струми в обмотці статора також подаються як сума зазначених послідовностей ($\underline{I}_{A11} = \underline{I}_{11}, \underline{I}_{B11}, \underline{I}_{C11}; \underline{I}_{A12} = \underline{I}_{12}, \underline{I}_{B12}, \underline{I}_{C12}$), які зумовлені розглянутими симетричними системами напруг відповідно.

У зазначеній роботі [47] струм прямої послідовності $\underline{I}_{11}$ у фазі «А» статора знаходять за допомогою схеми заміщення асинхронної машини, яка наведена на рис. 2 а, де $s_1 = (\Omega_1 - \Omega)/(\Omega_1)$ – ковзання ротора відносно поля цієї послідовності. Тут Ω_1 і Ω – кутові швидкості відповідно цього поля та ротора. При цьому струм прямої послідовності ($\underline{I}_{11}$) визначається за допомогою відповідної їй системи напруг і опору обмотки статора.

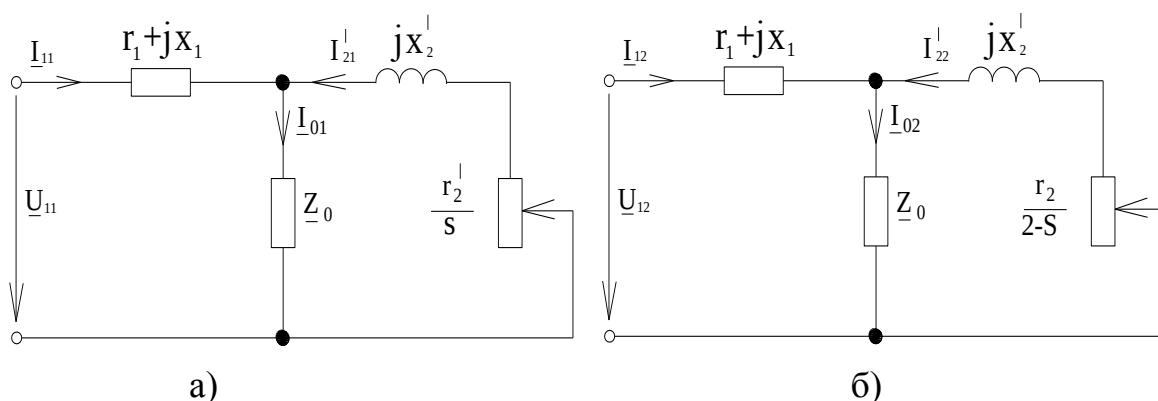


Рис. 2. Схема заміщення асинхронного двигуна для напруг прямої (а) та зворотної (б) послідовностей

Для обчислення струму зворотної послідовності $\underline{I}_{12}$ в фазі «А» статора використовується схема заміщення, наведена на рис. 2б, яка відрізняється від попередньої тим, що в неї введено ковзання ротора відносно поля зворотної послідовності, $s_2 = (-\Omega_1 - \Omega)/\Omega_1 = 2 - s$, де $(-\Omega_1)$

– кутова швидкість останнього. Після розрахунку струмів $\underline{I}_{11}$ та $\underline{I}_{12}$ в фазі «А», повні струми в кожній із фаз статора знаходять як їх векторну суму.

Результуючий обертовий момент асинхронного двигуна (M) при порушенні симетрії напруг визначається як сума моментів M_1 та M_2 , пов'язаних із напругами прямої та зворотної послідовностей відповідно. Дана модель, хоча й дозволяє виконати аналіз енергетичної ефективності двигуна, але лише у випадку несиметрії напруги живлення.

Заслугує також на увагу математичний аналог АД, описаний у [48]. Тут досліджується робота машини при несинусоїдальній несиметричній напрузі живлення в усталеному режимі. Автор виконує заміну диференціальних рівнянь трифазної асинхронної машини в осях α - β -0 на комплексні форми:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_a^s \\ \underline{U}_\beta^s \\ \underline{U}_a^r \\ \underline{U}_\beta^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r^s + jx^s & 0 & jx_m & 0 \\ 0 & r^s + jx^s & 0 & jx_m \\ jx_m & \nu M' & r^r + jx^r & \nu L^r \\ -\nu M' & jx_m & -\nu L^r & r^r + jx^r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_a^s \\ \underline{I}_\beta^s \\ \underline{I}_a^r \\ \underline{I}_\beta^r \end{pmatrix} \quad (8)$$

Далі вводяться складові прямої та зворотної послідовностей напруг і струмів за осями α - β . За відсутності нульової послідовності отримано такі вирази:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{np} + \underline{U}_{обр}; \underline{I}_a = \underline{I}_{np} + \underline{I}_{обр}; \\ \underline{U}_b &= a^2 \underline{U}_{np} + a \underline{U}_{обр}; \underline{I}_b = a^2 \underline{I}_{np} + a \underline{I}_{обр}; \\ \underline{U}_c &= a \underline{U}_{np} + a^2 \underline{U}_{обр}; \underline{I}_c = a \underline{I}_{np} + a^2 \underline{I}_{обр}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здійснений перехід від диференціальних рівнянь щодо напруг трифазної машини в осях α - β -0 до комплексних рівнянь відповідає загальновідомим схемам заміщення. Як зазначає автор, параметри останніх можуть бути отримані дослідним або розрахунковим шляхом.

Виконавши попередній розрахунок струмів, визначається значення середнього за період електромагнітного моменту за формулою:

$$M_e = \int_0^T M(t) dt / T.$$

У результаті обчислюється значення коефіцієнта корисної

дії машини (η) та коефіцієнта потужності ($\cos \phi$). Розглянута модель дозволяє здійснити аналіз енергетичної ефективності асинхронного двигуна за умов несиметричної несинусоїдальної напруги в мережі живлення, однак потребує певного доопрацювання, оскільки, окрім розгляду лише статичних режимів, так само як і попередня, не враховує змін частоти напруги живлення.

Висновки. На підставі проведеного аналізу існуючих математичних аналогів асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором можна припустити, що єдиної моделі, яка дозволяє оцінити енергетичну ефективність електричної машини, що працює в умовах неякісного

живлення, тобто такої, що враховує всі показники якості електроенергії (ПЕЕ) одночасно, не існує. Втім, існують моделі, які відображають вплив окремих показників якості напруги живлення на роботу електромеханічного перетворювача.

На нашу думку, із ситуації, що склалася, існує лише один вихід – створення імітаційної моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, використовуючи як обчислювальні блоки елементи вищенаведених моделей. Їх об'єднання дозволить врахувати всі показники якості електроенергії одночасно. Однак визначення параметрів схеми заміщення електромеханічного перетворювача розрахунковим шляхом можливе лише за сталої частоти напруги живлення. Якщо ж вона змінюється, то вищезазначене можливо лише на основі проведення відповідного експерименту.

Література

1. Kuznetsov V.V., Tryputen M.M., Kuznetsov V.G., Tryputen M., Kuznetsova A., Kuznetsova Y. Choosing of asynchronous motor protection equipment in production environment *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. 985 (1), art. no. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/985/1/012022
2. Waide, P., Brunner, C.U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems; *International Energy Agency: Paris, France*, 2011. 131p.
3. Modeling of structural elements of the energy-economic model «Electric network - electric consumer»: *Monograph*. M. Tryputen, V. Kuznetsov, V. Kovalenko, V. Artemchuk, S. Levchenko. Karlsruhe, 2024. 138 p. DOI: <https://doi.org/10.30890/978-3-98924-021-6>.2024
4. 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>
5. EN 50160:2010. Voltage Disturbances Standard EN 50160-Voltage Characteristics in Public Distribution Systems; *Normalization Spanish Association: Madrid, Spain*, 2010.
6. IEEE Std 519-2014. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Standards Association*.
7. IEEE Std 1159-2019. (2019). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Standards Association*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
8. Kuznetsov V., Tryputen N., Kuznetsova Ye. Evaluating the effect of electric power quality upon the efficiency of electric power consumption (2019) *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings*, art. no. 8879841, pp. 556 - 561, DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879841

9. Pedra, J. Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*. 2006. Vol. 153, Issue 2. P. 197. doi: 10.1049/ip-gtd:20045209.
10. Krishnan, R. Electric Motor Drives – Modeling, Analysis and Control. *PHI Learning Private Limited, New Delhi*, 2010. 626 p.
11. Kirtley, J. L. 6.685 Electric Machines,” Massachusetts Institute of Technology [Text]. *MIT OpenCourseWare*, 2005.
12. Chapman, S. J. Electric Machinery Fundamentals [Text] / S. J. Chapman; Fourth Ed. *Mc Graw Hill New York, USA*, 2005. 737 p.
13. Hachicha M. R., Hadj N. B., Ghariani M., Neji R. Finite element method for induction motor parameters identification [Text]. *Proc. 2012 First Intl. Conf. on Renewable Energies and Vehicular Technology*, 2012. P. 490–496. doi: 10.1109/revet.2012.6195318.
14. Gmiden, M. H., Trabelsi H. Calculation of two axis induction motor model using finite elements with coupled circuit [Text]. *6th Intl. Multi-conference on systems, signals and devices*, 2009. P. 1–6. doi: 10.1109/ssd.2009.4956785.
15. Bhattacharjee, S. A modified scalar control strategy of an induction motor with applications in traction [Text]. *IAEME Intl. J. Elec. Engg. Tech.* 2012. Vol. 3, Issue 2. P. 394–404.
16. 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 (2021). *Energy Systems Research* 2021. doi.org/10.1051/e3sconf/202128901002
17. 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>
18. Nasir, B.A. 2022. Determination of the Harmonic Losses in an Induction Motor Fed by an Inverter. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 12, 6 (Dec. 2022), 9536–9545. DOI:<https://doi.org/10.48084/etasr.5012>.
19. E.F. Fuchs, Mohammad A.S. Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, 2nd Edition, *Elsevier*, (2015)
20. Enrique C. Quispe, Ivan D. Lopez, Fernando J.T.E. Ferreira, Vladimir Sousa, Unbalanced voltages impacts on the energy performance of induction motors, *IJECE* Vol. 8, No. 3, (2018)
21. Bryan, J. (2011). Effect of Voltage Variation on Induction Motor Characteristics. *Electrical Apparatus Service Association (EASA)*. Available at: https://easa.com/training/private-webinars/effect-of-voltage-variation-on-induction-motor-characteristics?utm_source
22. Nadir Benamira, Azzeddine Dekhane, Ahmed Bouraiou, Issam Atoui, Exploring the effects of overvoltage unbalances on three phase induction motors: Insights from motor current spectral analysis and discrete wavelet transform energy assessment, *Computers and Electrical Engineering*,

- Volume* 117, 2024,109242, ISSN 0045-7906, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109242>.
23. Elgammal M.A., Abou-Ghazala A.Y. and Elshennawy T.I. Effects of Voltage Sags on Induction Motors. *Acta Electrotehnica*. Volume 50, Number 4, 2009. pp.245-252.
 24. Dongdong Zhang Effects of Voltage Sag on the Performance of Induction Motor Based on a New Transient Sequence Component Method. *CES transactions on electrical machines and systems*, Vol. 3, No. 3, September 2019. pp.316-324.
 25. Chen, J., Zuo, H., Yu, Q. et al. Influence of Dynamic Characteristics of Induction Motor on Voltage Sag Caused by Short Circuit Fault. *J. Electr. Eng. Technol.* 15, 1511–1519 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00433-6>
 26. T. Liu, M. Jiang, D. Zhang, H. Zhao and F. Shuang, "Effect of Symmetrical Voltage Sag on Induction Motor Considering Phase-Angle Factors Based on a New 2-D Multi-Slice Time-Stepping Finite Element Method," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 75946-75956, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988581
 27. Yang, G., et al.: Reduced-order electromagnetic transient model based onequivalent flux linkage derivative for induction motorsunder voltage sag condition. *IET Electr. Power Appl.*18(6), 693–703 (2024). <https://doi.org/10.1049/elp2.12421>YANG ET AL. - 703
 28. Kopylov I.P. Mathematical Models Of Electric Machines. Available at: <https://archive.org/details/igor-petrovich-kopylov-mathematical-models-of-electric-machines-mir-publishers-1984>
 29. Kovach, K.P. and Rats, I.L. 1963. Processes in alternating current machines. Gosenergoizdat, 744 p.
 30. Nikiyan, N.G. From the Mathematical Model of a Real Electrical Machine to Its Permissible Load. *Bulletin of Orenburg State University*. No. 1. January 2006. Vol. 2. pp. 121–127.
 31. Nikiyan, N.G. Mathematical Models of Three-Phase Asynchronous Machines Considering Technological and Operational Deviations. *Bulletin of Orenburg State University*. No. 1 (4). 2000. pp. 59–64.
 32. Kalynov, A.P., Mamchur, D.H. Mathematical Models for Studying the Influence of Structural Asymmetries of Electrical Machines on Their Electromagnetic Parameters. *Visnyk of Kryvyi Rih State Pedagogical University*. Issue 3/2007 (44). Part 2. pp. 150–154. (In Ukrainian)
 33. Степчин Я. А., Отаманський В. В., Малишев І. П. Аналіз динамічних процесів у високошвидкісних шпиндельних вузлах металорізальних верстатів з врахуванням різних видів нелінійності. *Вісник хмельницького національного університету* серія: Технічні науки. , Issue 1, 2022 (305) с. 134-139. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-134-139
 34. Електричні машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі / Л.І. Мазуренко, О.М. Попович, В.В. Гребеніков, О.В. Бібік, І.В.

- Головань, О.В. Джура, Ю.В. Шуруб, А.П. Вербовий, В.І. Романенко // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: зб. наук. пр.* К.: ІЕД НАНУ, 2011. Вип 29. С. 62-70.
35. Бондар Р. П., Голенков Г. М., Литвин О. Ю. Моделювання енергетичних характеристик вібратора з лінійним електричним приводом. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Випуск 2/2013 (22).с.66-74.
 36. Cherny, A.P., Kalinov, A.P., & Kirichkov, V.A. Assessment of Energy Conversion Quality in Electrical Machines Considering Supply Voltage Parameters. *Visnyk of Kryvyi Rih State Pedagogical University*. Issue 4/2007 (45). Part 1. pp. 67–69.
 37. Rodkin, D.I., Zdor, I.N., & Prus, V.V. Determination of Post-Repair Rated Power of an Asynchronous Motor with a Squirrel-Cage Rotor. Problems of Creating New Machines and Technologies. *Collected Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic Institute*. Issue 1/2000 (8). Kremenchuk: KSPI, 2000. pp. 65–71.
 38. Rodkin, D.I., & Mospan, V.A. Loss Equivalencing in Asynchronous Motors under Dynamic Loading. Problems of Creating New Machines and Technologies. *Collected Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic Institute*. Issue 1/2000 (8). Kremenchuk: KSPI, 2000. pp. 96–107.
 39. Rodkin, D.I., & Zdor, I.V. Modern Methods for Determining Parameters of Asynchronous Motors after Repair. Problems of Creating New Machines and Technologies. *Collected Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic Institute*. Issue 1/1998 (5). Kremenchuk: KSPI, 1998. pp. 106–117.
 40. Rodkin, D.I., & Romashikhin, Y.V. Potential and Efficiency of the Energy Diagnostics Method in Identification Problems. *Collected Scientific Works of Dniprodzerzhynsk State Technical University*. Dniprodzerzhynsk: DSTU, 2007. pp. 507–512.
 41. Rodkin, D.I., & Zdor, I.E. Features of Determining the Equivalent Circuit Parameters of an Asynchronous Motor when Powered from a Three-Wire Line. *Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic University*. Issue 1/2001 (10). pp. 212–216.
 42. Rodkin, D.I. On Energy Conversion in Electromechanical Systems. *Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic University*. Issue 2/2000 (9). pp. 106–111.
 43. Kovalev, E.B., Tolochko, O.I., & Chekavskiy, H.S. Mathematical Modeling of an Asynchronous Motor with Reactive Power Compensation Using Static Capacitors. *Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic University*. Issue 2/2000 (9). pp. 287–294.
 44. Voinova, T.V. Mathematical Model for Studying a Three-Phase Asynchronous Motor with a Squirrel-Cage Rotor as a Control Object for Direct Processor-Based Control. *Elektrotehnika (Electrotechnics)*. No. 6. 1998. pp. 51–61.
 45. Voinova, T.V. Software for Modeling a Three-Phase Asynchronous Motor

- with a Squirrel-Cage Rotor as Part of a Drive Control System and for Sensorless Measurement of Controlled Variables. *Elektrotekhnik (Electrotechnics)*. No. 1. 2000. pp. 19–25.
46. Bespalov, V.Ya., Moshchinsky, Y.A., & Petrov, A.P. Dynamic Characteristics of Three-Phase Asynchronous Motors Connected to a Single-Phase Network. *Elektrotekhnik (Electrotechnics)*. No. 1. 2000. pp. 13–19.
47. Ivanov-Smolyensky, A.V. *Electrical Machines*. 1982. 927 p.
48. Kopylov, I.P., & Shchedrin, O.P. *Computer-Based Calculation of Asynchronous Machine Characteristics*. 1973. 212 p.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF INDUCTION MOTOR MODELING UNDER POOR POWER QUALITY CONDITIONS

Nikolenko Anatolii, Kuznetsov Vitalii, .Stopkin Vasyl, Kovalenko Viktor, Rovenskyi Oleh, Pilipenko Viacheslav

The article explores methodological approaches to modeling the operation of a squirrel-cage induction motor under conditions of poor power quality. The relevance of the research is driven by the significant share of electric motors in global energy consumption—up to 46%—and the detrimental impact of power quality deviations on the efficiency, reliability, and service life of electromechanical systems. A comprehensive analysis of the current state of mathematical modeling of induction motors is presented, with emphasis on the limitations of most existing models, which typically assume symmetrical and sinusoidal supply voltage, thus failing to reflect real-world industrial conditions.

Various classes of mathematical models are examined, particularly those that account for certain aspects of power quality such as voltage asymmetry, harmonic distortions, and frequency instability. It is shown that these models, although effective in specific cases, cannot provide a holistic evaluation of the motor's energy performance. The article formulates the requirements for a unified simulation model of an induction motor that can simultaneously account for all major power quality indicators (PQIs), both in steady-state and transient operating conditions.

The proposed model is based on the integration of computational blocks from existing analogs, enabling consideration of non-sinusoidal and unbalanced supply voltages. It allows the calculation of instantaneous stator and rotor currents, core and copper losses, electromagnetic torque, efficiency, and power factor. The model is expandable to incorporate harmonic filtering and variable frequency conditions, with the possibility of parameter refinement through experimental identification.

It is concluded that no single universal model currently exists to evaluate the energy performance of induction motors under degraded power supply conditions. Therefore, the creation of a new-generation simulation model is proposed as a viable and necessary solution for the comprehensive analysis of motor operation in realistic power networks.

Keywords: induction motor, mathematical modeling, power quality, voltage asymmetry, non-sinusoidal voltage, energy efficiency, simulation model, electromechanical converter.

References

1. Kuznetsov V.V., Tryputen M.M., Kuznetsov V.G., Tryputen M., Kuznetsova A., Kuznetsova Y. (2020) Choosing of asynchronous motor protection equipment in production environment *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985 (1), art. no. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/985/1/012022
2. Waide, P. , Brunner, C.U. (2011) Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems; *Internationnal Energy Agency*: Paris, France.
3. M. Tryputen, V. Kuznetsov, V. Kovalenko, V. Artemchuk, S. Levchenko. (2024) Modeling of structural elements of the energy-economic model «Electric network - electric consumer»: *Monograph*. Karlsruhe. DOI: <https://doi.org/10.30890/978-3-98924-021-6.2024>
4. Beileiu, 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>
5. EN 50160:2010. (2010) Voltage Disturbances Standard EN 50160-Voltage Characteristics in Public Distribution Systems; *Normalization Spanish Association*: Madrid, Spain.
6. IEEE Std 519-2014. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Standards Association*.
7. IEEE Std 1159-2019. (2019). *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE Standards Association. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
8. Kuznetsov V., Tryputen N., Kuznetsova Ye. (2019) Evaluating the effect of electric power quality upon the efficiency of electric power consumption. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings*, art. no. 8879841, pp. 556 - 561, DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879841
9. Pedra, J. (2006) Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation [Text] *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*. Vol. 153, Issue 2. P. 197. doi: 10.1049/ip-gtd:20045209.
10. Krishnan, R. (2010) Electric Motor Drives – Modeling, Analysis and Control [Text] PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2010. 626 p.
11. Kirtley, J. L. (2005) 6.685 Electric Machines. Massachusetts Institute of Technology [Text]. *MIT OpenCourseWare*.
12. Chapman, S. J. (2005) Electric Machinery Fundamentals [Text] / Fourth Ed. Mc Graw Hill New York, USA, 737 p.

13. Hachicha, M. R., Hadj N. B., Ghariani M., Neji R. (2012) Finite element method for induction motor parameters identification [Text] *Proc. 2012 First Intl. Conf. on Renewable Energies and Vehicular Technology*, P. 490–496. doi: 10.1109/revet.2012.6195318.
14. Gmiden, M. H., Trabelsi H. (2009) Calculation of two axis induction motor model using finite elements with coupled circuit [Text]. *6th Intl. Multi-conference on systems, signals and devices*, P. 1–6. doi: 10.1109/ssd.2009.4956785.
15. Bhattacharjee, S. (2012) A modified scalar control strategy of an induction motor with applications in traction [Text] *IAEME Intl. J. Elec. Engg. Tech.* Vol. 3, Issue 2. P. 394–404.
16. 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
17. 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>
18. Nasir, B.A. 2022. Determination of the Harmonic Losses in an Induction Motor Fed by an Inverter. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 12, 6 (Dec. 2022), 9536–9545. DOI:<https://doi.org/10.48084/etasr.5012>.
19. E.F. Fuchs, Mohammad A.S. Masoum (2015) *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, 2nd Edition, Elsevier.
20. Enrique C. Quispe, Ivan D. Lopez, Fernando J.T.E. Ferreira, Vladimir Sousa. (2018) Unbalanced voltages impacts on the energy performance of induction motors, *IJECE* Vol. 8, No. 3,
21. Bryan, J. (2011) Effect of Voltage Variation on Induction Motor Characteristics. *Electrical Apparatus Service Association (EASA)*. Available at: https://easa.com/training/private-webinars/effect-of-voltage-variation-on-induction-motor-characteristics?utm_source
22. Nadir Benamira, Azzeddine Dekhane, Ahmed Bouraiou, Issam Atoui (2024) Exploring the effects of overvoltage unbalances on three phase induction motors: Insights from motor current spectral analysis and discrete wavelet transform energy assessment, *Computers and Electrical Engineering*, V.117, 109242, ISSN 0045-7906, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109242>.
23. Elgammal M.A., Abou-Ghazala A.Y. and Elshennawy T.I. (2009) Effects of Voltage Sags on Induction Motors. *ACTA ELECTROTEHNICA*. Volume 50, Number 4. pp.245-252.
24. Dongdong Zhang (2019) Effects of Voltage Sag on the Performance of Induction Motor Based on a New Transient Sequence Component Method. *CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS*, Vol. 3, No. 3, pp.316-324.
25. Chen, J., Zuo, H., Yu, Q. et al. (2020) Influence of Dynamic Characteristics

- of Induction Motor on Voltage Sag Caused by Short Circuit Fault. *J. Electr. Eng. Technol.* 15, P.1511–1519. <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00433-6>
26. T. Liu, M. Jiang, D. Zhang, H. Zhao and F. Shuang. (2020) Effect of Symmetrical Voltage Sag on Induction Motor Considering Phase-Angle Factors Based on a New 2-D Multi-Slice Time-Stepping Finite Element Method. in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 75946-75956, , doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988581
 27. Yang, G., et al. (2024). Reduced-order electromagnetic transient model based onequivalent flux linkage derivative for induction motors under voltage sag condition. *IET Electr. Power Appl.* 18(6), pp.693–703 <https://doi.org/10.1049/elp2.12421> YANG ET AL.
 28. I. P. Kopylov (1984) Mathematical Models Of Electric Machines Available at: <https://archive.org/details/igor-petrovich-kopylov-mathematical-models-of-electric-machines-mir-publishers-1984>
 29. Kovach, K.P. and Rats, I.L. (1963). Processes in alternating current machines. *Gosenergoizdat*, 744 p.
 30. Nikiyan, N.G. (2006) From the Mathematical Model of a Real Electrical Machine to Its Permissible Load. *Bulletin of Orenburg State University*. No. 1. January 2006. Vol. 2. pp. 121–127.
 31. Nikiyan, N.G. (2000) Mathematical Models of Three-Phase Asynchronous Machines Considering Technological and Operational Deviations. *Bulletin of Orenburg State University*. No. 1 (4). pp. 59–64.
 32. Kalynov, A.P., Mamchur, D.H. (2007) Mathematical Models for Studying the Influence of Structural Asymmetries of Electrical Machines on Their Electromagnetic Parameters. *Visnyk of Kryvyi Rih State Pedagogical University*. Issue 3/2007 (44). Part 2. pp. 150–154. [In Ukrainian]
 33. Stepchyn, Ya.A., Otamanskyi, V.V., & Malyshev, I.P. (2022) Analysis of Dynamic Processes in High-Speed Spindle Units of Metal-Cutting Machines Considering Different Types of Nonlinearities. *Bulletin of Khmelnytskyi National University*. Series: Technical Sciences. Issue 1, (305), pp. 134–139. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-305-1-134-139
 34. Mazurenko, L.I., Popovych, O.M., Grebenikov, V.V., Bibik, O.V., Holovan, I.V., Dzhura, O.V., Shurub, Yu.V., Verbovyi, A.P., & Romanenko, V.I. (2011) AC Electrical Machines and Electromechanical Systems Based on Them. // *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Collected Scientific Papers*. Kyiv: IED NASU, 2011. Issue 29, pp. 62–70.
 35. Bondar, R.P., Holenkov, H.M., & Lytvyn, O.Yu. (2013) *Modeling of Energy Characteristics of a Vibrator with Linear Electric Drive*. Electromechanical and Energy Saving Systems. Issue 2/2013 (22), pp. 66–74.
 36. Cherny, A.P., Kalinov, A.P., & Kirichkov, V.A. (2007) Assessment of Energy Conversion Quality in Electrical Machines Considering Supply Voltage Parameters. *Visnyk of Kryvyi Rih State Pedagogical University*. Issue 4/2007 (45). Part 1. pp. 67–69.

37. Rodkin, D.I., Zdor, I.N., & Prus, V.V. (2000) Determination of Post-Repair Rated Power of an Asynchronous Motor with a Squirrel-Cage Rotor. *Problems of Creating New Machines and Technologies*. Collected Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic Institute. Issue 1/2000 (8). Kremenchuk: KSPI, 2000. pp. 65–71.
38. Rodkin, D.I., & Mospan, V.A. (2000) Loss Equivalencing in Asynchronous Motors under Dynamic Loading. *Problems of Creating New Machines and Technologies*. Collected Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic Institute. – Issue 1/2000 (8). Kremenchuk: KSPI, 2000. pp. 96–107.
39. Rodkin, D.I., & Zdor, I.V. (1998) Modern Methods for Determining Parameters of Asynchronous Motors after Repair. *Problems of Creating New Machines and Technologies*. Collected Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic Institute. Issue 1. (5). Kremenchuk: KSPI, 1998. pp. 106–117.
40. Rodkin, D.I., & Romashikhin, Y.V. (2007) Potential and Efficiency of the Energy Diagnostics Method in Identification Problems. *Collected Scientific Works of Dniprodzerzhynsk State Technical University*. Dniprodzerzhynsk: DSTU. pp. 507–512.
41. Rodkin, D.I., & Zdor, I.E. (2001) Features of Determining the Equivalent Circuit Parameters of an Asynchronous Motor when Powered from a Three-Wire Line. *Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic University*. Issue 1/2001 (10). pp. 212–216.
42. Rodkin, D.I. (2000) On Energy Conversion in Electromechanical Systems. *Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic University*. Issue 2/2000 (9). pp. 106–111.
43. Kovalev, E.B., Tolochko, O.I., & Chekavskiy, H.S. (2000) Mathematical Modeling of an Asynchronous Motor with Reactive Power Compensation Using Static Capacitors. *Scientific Works of Kremenchuk State Polytechnic University*. Issue 2/2000 (9). pp. 287–294.
44. Voinova, T.V. (1998) Mathematical Model for Studying a Three-Phase Asynchronous Motor with a Squirrel-Cage Rotor as a Control Object for Direct Processor-Based Control. *Elektrotehnika (Electrotechnics)*. No. 6. pp. 51–61.
45. Voinova, T.V. (2000) Software for Modeling a Three-Phase Asynchronous Motor with a Squirrel-Cage Rotor as Part of a Drive Control System and for Sensorless Measurement of Controlled Variables. // *Elektrotehnika (Electrotechnics)*. No. 1.2000. pp. 19–25.
46. Bespalov, V.Ya., Moshchinsky, Y.A., & Petrov, A.P. (2000) Dynamic Characteristics of Three-Phase Asynchronous Motors Connected to a Single-Phase Network. *Elektrotehnika (Electrotechnics)*. No. 1. pp. 13–19.
47. Ivanov-Smolyensky, A.V. (1982) *Electrical Machines*. 927 p.
48. Kopylov, I.P., & Shchedrin, O.P. (1973) Computer-Based Calculation of Asynchronous Machine Characteristics. 212 p.