

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

РУДЕНКО МИКИТА АНДРІЙОВИЧ

УДК 621.3.016:62-52

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З АСИНХРОННИМ  
ДВИГУНОМ І ВРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ ВИТІСНЕННЯ СТРУМУ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Кременчук – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі систем автоматичного управління і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Зачепа Юрій Володимирович**, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри систем автоматичного управління і електроприводу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Островерхов Микола Якович**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри теоретичної електротехніки;

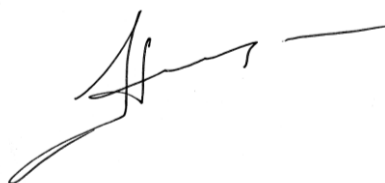
доктор технічних наук, доцент  
**Титюк Валерій Костянтинович**, Криворізький національний університет Міністерства освіти і науки України, професор кафедри електромеханіки

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р. о \_\_\_ год. \_\_\_ хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського за адресою: ауд. \_\_\_\_\_, корпус № \_\_\_, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600) і на сайті спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 за електронною адресою: [http://www.kdu.edu.ua/spec\\_rada/avtoref\\_recall.php?id\\_r=3](http://www.kdu.edu.ua/spec_rada/avtoref_recall.php?id_r=3).

Автореферат розісланий «\_\_\_» березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к. т. н., доц.



А. В. Некрасов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У результаті інтенсивної чи довготривалої роботи асинхронні двигуни (АД) виходять з ладу по ряду причин – ненормальні умови роботи, неякісна напруга мережі живлення, складні умови експлуатації, природні процеси старіння, відхилення в технології обслуговування, порушення технології виробництва (дефекти під час виготовлення) тощо.

Більшість АД, що підлягають ремонту, після проведення відповідних процедур повертаються на колишні місця експлуатації. Однак процес ремонту характеризується досить великою імовірністю зміни електромагнітних параметрів (ЕМП) АД відносно паспорта заводу-виробника. Тому, виникає необхідність проводити переналагодження устаткування і розрахунок регуляторів для систем управління. Окрім того, точне знання ЕМП необхідне для розрахунку пускових і робочих характеристик, визначення навантажувальної здатності двигуна, втрат потужності тощо, але особливо для реалізації алгоритмів для забезпечення енерго- і ресурсо-ефективного керування асинхронним електроприводом (АЕП). Останнє потребує проведення ідентифікації ЕМП АД з урахуванням нелінійностей, спричинених різними фізичними явищами і процесами під час пуску і усталеної роботи (втрати в сталі, нелінійність кривої намагнічування, ефекти насичення сталі та витіснення струму тощо). Отже, використання ЕМП АД, що адекватно відображають реальні фізичні процеси, дозволить розв'язувати широкий спектр технічних завдань прогнозування, контролю, керування процесами в електромеханічних і енергетичних системах.

Питання ідентифікації ЕМП АД відображені у багатьох роботах вітчизняних: Сивокобыленко В. Ф., Бешта О. С., Пересада С. М., Родькін Д. Й., Калінов А. П., Мощинский Ю. А., Тюков В. А., Пастухов В. В., Корнєєв К. В., і зарубіжних учених: Aredes M., Park J., Kim B., Yang J., Lee S. B., Wiedenbrug E. J., Teska M., Seungoh H., Popenda A., Benecke M., Doebbelin R., Griepentrog G., Lindemann A.

Однак більшість розроблених методів і методик післяремонтних випробувань знайшли своє застосування лише в окремих випадках ідентифікації ЕМП АД, оскільки повна процедура ідентифікації потребує часткової або повної розбірки двигуна, додаткового обладнання для навантаження досліджуваного двигуна, використання великої кількості датчиків, що значно збільшує тривалість процесу ідентифікації. Крім того, слід зазначити, що практично всі методи направлені на ідентифікацію ЕМП АД в певній точці робочих характеристик, а тому не враховують ефекти насичення сталі та витіснення струму, що впливають на точність визначення параметрів і, відповідно, налаштування АЕП у перехідних режимах. Це призводить до порушень технологічного процесу, а, отже, збільшення браку продукції, зокрема у пресово-ковальських механізмах, «летючих» ножицях тощо.

Отже, *актуальним* науковим завданням є розробка методу ідентифікації ЕМП АЕП у перехідних режимах та системи електротехнічного комплексу для його реалізації. В роботі запропоновано розв'язання задачі на основі енергетичного методу, удосконаленого для урахування ефекту витіснення струму ротора АД, що

ґрунтується на основі рівнянь балансу миттєвої потужності і забезпечує необхідну точність результатів при невисоких обчислювальних ресурсах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основний зміст роботи складають результати досліджень, проведені автором протягом 2012–2020 років.

Робота відповідає Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема п. 6 статті 7 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» та спрямованості тематики науково-дослідних робіт кафедри «Систем автоматичного управління та електроприводу» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Матеріали роботи використані при виконанні бюджетної науково-дослідної роботи (НДР) Міністерства освіти і науки України: «Оцінка параметрів асинхронних двигунів з ефектом витіснення струму в роторі», (№ ДР 0116U000344, 2017 р.), у якій автор був співвиконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає у ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних електроприводів у перехідних режимах з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі.

*Для досягнення мети поставлені та розв'язані такі задачі:*

- аналіз та оцінка існуючих методів ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів;
- теоретичне обґрунтування доцільності врахування залежності активного опору від струму ротора та експериментальні дослідження впливу струму ротора на активний опір ротора АД при загальмованому роторі;
- обґрунтування можливості застосування неперіодичних сигналів на довільному періоді для дослідження процесів пуску АД і розробка математичної моделі АД, що враховує особливості нелінійної зміни активного опору ротора під впливом ефекту витіснення струму;
- розробка математичного апарату для отримання різних видів періодичних сигналів при розкладанні в ряд Фур'є і оцінка ефективності застосування полігармонічних сигналів напруги та струму, що мають симетрію, при ідентифікації ЕМП АЕП за допомогою рівнянь балансу миттєвої потужності;
- розробка структури та алгоритму роботи електротехнічного комплексу з реалізацією розробленого методу ідентифікації ЕМП АЕП на підставі рівнянь балансу миттєвої потужності з урахуванням впливу ефекту витіснення струму в роторі, як під час пуску, так і в усталеному режимі роботи ЕП;
- розробка схемних рішень щодо комплектації електротехнічного комплексу та експериментальні дослідження з ідентифікації ЕМП АЕП на основі запропонованого методу для підтвердження основних теоретичних результатів роботи.

*Об'єкт дослідження* – процес ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного електроприводу.

*Предмет дослідження* – методи ідентифікації із врахуванням впливу нелінійних залежностей електромагнітних параметрів асинхронного електроприводу на результат ідентифікації параметрів схеми заміщення.

**Методи дослідження.** При розв'язанні завдань дослідження використовувалися фундаментальні положення фізики, математичні основи теорії рядів Фур'є, теорія електричних кіл, метод гармонічного аналізу для дослідження форм кривих струму, напруги та потужності; теорія автоматичного керування та електротехніки для створення математичних моделей асинхронного двигуна; методи апроксимації для аналітичного опису графіків зміни активного та індуктивного опору ротора асинхронного двигуна під впливом ефекту витіснення струму; математичне моделювання на ПК та експериментальні дослідження для перевірки теоретичних положень і наукових результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- уперше отримано аналітичні вирази, що встановлюють взаємозв'язок між зміною значень активного та індуктивного опорів ротора асинхронного двигуна під впливом ефекту витіснення струму та значенням роторного струму при пуску;

- отримав подальшого розвитку метод ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних електроприводів на основі балансу миттєвої потужності, який, на відміну від відомих, враховує вплив ефекту витіснення струму на параметри ротора електричної машини та дозволяє отримати відповідний гармонічний склад напруги і струму для забезпечення достатньої точності визначення параметрів;

- розвинені методи отримання тестових сигналів струмів і напруг для ідентифікації параметрів асинхронних електроприводів у пускових режимах, які, на відміну від відомих, за рахунок використання принципів осьової симетрії дозволяють отримати сигнали з необхідною амплітудою його синусних і косинусних складових та значення постійної складової.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових результатів, висновків і рекомендацій забезпечується коректністю прийнятих у математичних моделях припущень і підтверджується збігом результатів аналітичних розрахунків із результатами математичного та фізичного моделювання.

**Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено схему алгоритму визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна у складі електроприводу, який реалізує розроблений метод ідентифікації, що враховує вплив ефекту витіснення струму на параметри ротора електричної машини;

- розроблено та рекомендовано до використання методик формування тестових полігармонічних сигналів струмів і напруг з заданим гармонійним складом;

- розроблено схемні рішення електротехнічного комплексу для ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронного двигуна у перехідних режимах без ризику перегріву обмоток ротора і пошкодження ізоляції.

Випробування проводилися в науково-дослідній лабораторії кафедри «Системи автоматичного управління та електроприводу» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського та в умовах ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Горішні Плавні).

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі

Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при виконанні дипломних проектів і магістерських робіт зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», проведенні лекцій і лабораторного практикуму з дисциплін «Моніторинг та діагностика енергоємних виробництв», «Системи перетворення енергії та керування енергопроцесами».

**Особистий внесок здобувача.** Автор самостійно сформулював мету і задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, виконав теоретичну частину роботи, брав безпосередню участь у розробці випробувального обладнання та проведенні експериментальних досліджень.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1] – отримані математичні вирази для врахування впливу ефекту витіснення струму на активний опір та індуктивність ротора; [2, 5] – проведено ідентифікацію ЕМП АД з врахуванням ефекту витіснення струму в роторі енергетичним методом на математичній моделі з накопичувачами енергії; [3, 14] – запропоновано розрахункову схему заміщення, яка описує процеси в робочому й пусковому колах ротора двокліткового двигуна, а також отримано систему рівнянь балансу складових миттєвої потужності для ідентифікації ЕМП двокліткових АД; [4] – сформовані характерні відмінні ознаки методів оцінювання параметрів АД; [6, 17, 18] – обґрунтована можливість та доцільність використання в якості джерела живлення накопичувачів енергії при ідентифікації ЕМП АД з використанням енергетичного методу та врахуванням ефекту витіснення струму в роторі; [7, 15] – виконано аналіз електрофізичних процесів витіснення струму в роторі АД та представлено порівняння значень пускових моментів АД, що розраховані за різних методик; [8] – проаналізовані математичні методи вирішення систем ідентифікаційних рівнянь; [9, 10, 12] – обґрунтована можливість використання та отримання різних варіацій полігармонічних сигналів для застосування енергетичного методу; [11] – проведено синтез тестових ідентифікаційних сигналів струму та напруги з використанням принципу осьової симетрії; [16] – отримані аналітичні залежності активного опору ротора АД з урахуванням ефекту витіснення струму.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях: Усеукраїнській і Міжнародній науково-технічних конференціях молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації» (Кременчук, 2013–2018 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2014 р.); International conference on «Modern Electrical and Energy Systems» (MEES) (Kremenchuk, Ukraine, 2017 y.); XV International PhD Workshop OWD (Wisla, Poland, 2013 y.); Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE) 17th International Conference (Sandomierz, Poland, 2016 y.); науково-технічних семінарах Інституту електромеханіки, енергозбереження та систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (2015–2018 рр.).

Результати роботи обговорювалися на засіданнях науково-технічного семінару

«Електромеханіка, проблеми енергоперетворення і енергоресурсозбереження» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при Науковій раді НАН України з комплексної проблеми «Наукові проблеми електроенергетики» (2015–2018 рр.) і науковому семінарі Інституту електродинаміки НАН України (Київ, 2018 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 18 друкованих працях, з них 1 стаття у фаховому виданні Польщі, занесеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus, Web of Science), 5 статей у журналах України, занесених до міжнародних наукометричних баз даних (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, Directory of Research Journals Indexing, Scientific Indexing Services*), 4 – наукові статті у фахових виданнях України, 1 стаття надрукована в журналах України, 6 – тез доповідей на конференціях із них 1 тези надруковані в закордонному виданні, 1 – деклараційний патент України.

**Структура й обсяг дисертації.** Повний обсяг дисертації складає 225 сторінок друкованого тексту й містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і вісім додатків. Основна частина роботи викладена на 170 сторінках. Список використаних джерел складається зі 140 найменувань на 14 сторінках. Дисертація містить 66 рисунків і 39 таблиць, із них 19 рисунків і 19 таблиць повністю займають 17 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи і відображено її зв'язок з науковими програмами та планами НДР, сформульовано мету й основні наукові та практичні задачі дослідження, наведено наукові положення, що виносяться на захист, вказано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також рівень апробації результатів роботи, зазначено кількість публікацій й особистий внесок автора.

У **першому розділі** виконано огляд та аналіз сучасного стану проблеми щодо виходу асинхронних двигунів з ладу та зміни їх ЕМП в наслідок проведення ремонтних робіт і пов'язані з цим невизначеності при налагодженні систем ЕП після повернення з ремонту таких АД. За результатами аналізу виділені відмінні ознаки різних методів ідентифікації, що дозволило класифікувати їх за особливістю застосування, тривалістю процедури та обсягом необхідного обладнання.

Показано, що для точної ідентифікації ЕМП АЕП необхідно враховувати нелінійні залежності параметрів, викликані такими фізичними явищами і процесами як втрати в сталі, нелінійність кривої намагнічування і ефект витіснення струму. Відмічено, що найбільший вплив на варіацію ЕМП АЕП має ефект витіснення струму, а саме на збільшення активного опору ротора, що відбувається у пускових режимах. Це характерно не тільки у АД з підвищеним пусковим моментом, а й у загальнопромислових АД. Для останніх цей ефект не настільки ярко виражений як для глибокопазних АД. Проте для правильного налаштування роботи АЕП у перехідних режимах впливом цього ефекту на зміну ЕМП АД ігнорувати не можна.

Як приклад, представлені розрахунки пускового моменту для ряду АД різної потужності та конструкції за відомими формулами механічної характеристики, Клосса та уточненою формулою Клосса, а також за залежністю моменту АД на валу з використанням комплексних опорів і струмів відповідних електричних кіл. В результаті встановлено, що розрахункові значення моментів за кожною з зазначених формул не відповідають значенню, визначеному шляхом механічного навантаження. Найбільшою похибкою характеризується розрахунок пускового моменту за формулою механічної характеристики – відносне значення варіювалося у діапазоні 74,7...80,68 %. Для формули Клосса значення відносної похибки для різних АД варіювалося у діапазоні 65,1...65,85 %, а для уточненої – не менше 60,46...62,36 %. Найменшою розбіжністю з експериментальним значенням характеризується розрахунок пускового моменту за формулою з використанням комплексних опорів і струмів відповідних електричних кіл. І якщо для АД малої потужності відносна похибка не перевищує 3 % (наприклад, для АД типу 4А225М4 – 2,37 %), то вже для АД середньої потужності це значення вже становить не менше 25 % (наприклад, для АД типу 4А250М4 – 27,65 %, а для типу 4АН250М4 – 33,11 %). Встановлені розбіжності в розрахунках моментів пов'язані зі зміною ЕМП АЕП, а саме збільшенням активного опору ротора АД під дією ефекту витіснення струму. А налаштування ЕП здійснюється саме за даними паспорта АД, що визначені на робочій ділянці механічної характеристики і, відповідно, вплив ефекту витіснення в цьому випадку практично не позначається на значенні самих параметрів, на відміну від пускових режимів, коли дія ефекту витіснення струму на опір ротора є максимальною.

Показано, що на відміну від поверхневого ефекту, де нерівномірність розподілу струму у стрижні ротора пов'язано у першу чергу з такими параметрами як частота струму ротора, глибина проникнення струму та відносна висота провідника, а сам ефект проявляється здебільшого в масивному або цілісному провіднику та стає помітним при досить високих частотах, ефект витіснення струму, викликаний тим, що створене протікаючим струмом у стрижні ротора магнітне поле має нерівномірний розподіл ліній магнітної індукції, а, відповідно, і магнітного потоку, концентрація яких більша в нижніх частинах паза й провідника. Це пов'язано з тим, що магнітна проникність тіла ротора більша, ніж у провідного матеріалу стрижня ротора й у повітряного зазору.

Таким чином, магнітний потік рухається по шляху найменшого опору, концентруючись в області нижніх частин паза, і створює ЕРС, що викликає появу струму зустрічного первинному індукованому струму, що й призводить до зменшення щільності струму в нижніх частинах стержня. Отже, в основі ефекту витіснення струму лежить принцип самоіндукції, що за законом Ленца протидіє зміні струму в електричному колі: уповільнює його зростання або спадання. При розгляді стрижня ротора АД струми самоіндукції будуть спрямовані таким чином, щоб протидіяти зміні основного струму в нижніх частинах паза і сприяти його зміні поблизу повітряного зазору ротора. Таким чином, опір нижніх частин стрижня виявляється більшим, ніж верхніх. В зв'язку з цим виконано аналіз електрофізичних процесів витіснення струму у стрижні ротора глибокопазного АД та відмічено, що



для особливостей зміни ЕМП, викликаних цим ефектом, необхідно модифікувати існуючі методики або розробити новий метод їх ідентифікації для АЕП у пускових режимах.

У другому розділі представлено математичний апарат процедури ідентифікації ЕМП АЕП з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі. На прикладі модифікацій схем заміщення (СЗ) АД показано, що врахування нелінійної зміни його ЕМП можна здійснювати шляхом представлення активного опору та/або індуктивності відповідної гілки СЗ характерною нелінійною залежністю, яка й відображає вплив тих чи інших фізичних явищ.

Показано взаємозв'язок між струмом статора, напруженістю магнітного поля у повітряному зазорі, магнітною індукцією та магнітним потоком, що впливає на діючі значення ЕРС, а, відповідно, мають вплив і на значення струму та опору ротора:

$$E = -\frac{\mu S \cos \alpha}{2\pi r} \frac{dI_1}{dt}; \quad I_2 = \frac{E_i \pm E_{si}}{\sqrt{R_2^2 + X^2}} = \frac{\Delta E}{\sqrt{R_2^2 + X^2}}, \quad (1)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність середовища, Гн/м;  $I_1$  – струм у провіднику (струм статора), А;  $S$  – вектор площі, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – кут між вектором магнітної індукції і нормаллю до площини  $S$ , ел. град.;  $R_2$  – активний опір ротора, Ом;  $X$  – індуктивний опір ротора, Ом;  $I_2$  – струм ротора, А;  $E_i$  – ЕРС індукції, В;  $E_{si}$  – ЕРС самоіндукції, В. Згідно з правилом Ленца, чим більше буде ЕРС індукції, тим більше буде їй протидіяти ЕРС самоіндукції і тим більшим буде значення активного опору ротора. Отже, встановлено, що ефект витіснення струму впливає на розподіл струму у стрижні та його щільність, а також на зміну активного опору стрижня, а тому для непрямого розрахунку активного опору ротора з урахуванням впливу ефекту витіснення струму пропонується розглядати функцію  $f_{R_2}(I_2)$  активного опору та індуктивності ротора із залежністю від струму ротора вигляду:

$$R_2(I_2) = R'_2 + k_R I_2^2; \quad L_2(I_2) = L'_2 - k_L I_2^2, \quad (2)$$

де  $R'_2$  – активний опір ротора без урахування ефекту витіснення струму, Ом;  $I_2$  – струм ротора, А;  $k_R$  – коефіцієнт, що враховує витіснення струму для активного опору ротора, Ом/А<sup>2</sup>;  $L'_2$  – індуктивність ротора без урахування ефекту витіснення струму, Гн;  $k_L$  – коефіцієнт, що враховує витіснення струму для індуктивності ротора, Гн/А<sup>2</sup>.

Залежності (2) є результатом апроксимації відомих з літературних джерел графіків зміни активного та індуктивного опорів ротора під впливом ефекту витіснення струму.

Враховуючи той факт, що повний опір гілки намагнічування СЗ АД (рис. 1) значно перевищує повні опори гілок ротора і статора, а отже, струм  $I_\mu$  намагнічування значно менше струмів ротора  $I_2$  і статора  $I_1$ , то можна прийняти, що ці струми є приблизно однаковими. Тому зміна струму  $I_1$  статора призводить до зміни струму  $I_2$  ротора. Окрім того, при ідентифікації струм  $I_2$  ротора є

невідомим, а його вимірювання є досить складною операцією. Тому залежність активного опору ротора можна представити у вигляді:

$$R_2(I_1) = R'_2 + k_{R2}I_1^2, \quad (3)$$

де  $I_1$  – струм статора, А;  $k_{R2}$  – коефіцієнт, що враховує витіснення струму для активного опору ротора при залежності від струму статора, Ом/А<sup>2</sup>.

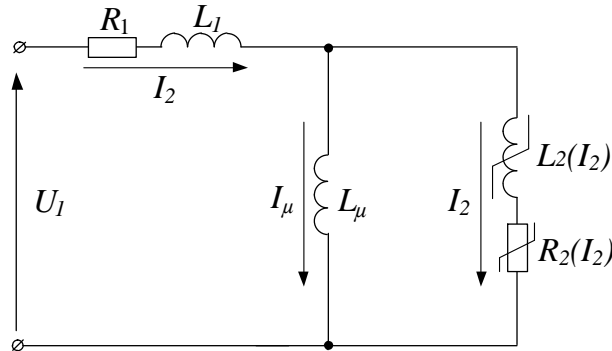


Рисунок 1 – Т-подібна СЗ АД з нелінійними активним опором та індуктивністю ротора

Для розрахунків використано математичний апарат формування рівнянь балансу складових миттєвої потужності, де врахування ефекту витіснення струму представлено у вигляді нелінійної залежності активного та індуктивного опору ротора від струму Т-подібної (рис. 1) СЗ АД і виникненням, у разі живлення від джерела синусоїдальної напруги, у тестових сигналах гармонійних складових.

Для СЗ АД рис. 1 складові миттєвої потужності кожного елемента:

– джерело живлення:  $P_u(t) = u_u(t)i_u(t)$ ;

– активні опори статора і ротора:  $P_{R1}(t) = i_1^2(t)R_1$ ;  $P_{R2}(t) = i_2^2(t)(R'_2 + k_{R2}i_2^2(t))$ ;

– індуктивність статора, гілки намагнічування і ротора:  $P_{L1}(t) = L_1\dot{i}_1(t)di_1(t)/dt$ ;

$P_{L\mu}(t) = L_\mu\dot{i}_\mu(t)di_\mu(t)/dt$ ;  $P_{L2}(t) = [L'_2 - k_L i_2^2(t)]i_2(t)di_2(t)/dt$ ;

– підсумкове рівняння балансу потужності:

$$P_u(t) = u_u(t)i_u(t) = P_{R1}(t) + P_{R2}(t) + P_{L1}(t) + P_{L2}(t) + P_{L\mu}(t). \quad (4)$$

Одночасне врахування нелінійності в активному опорі та індуктивності ротора дозволяє ідентифікувати ЕМП у пусковому режиму роботи АД, так як саме в цьому режимі схильні до значної зміни обидва даних параметра.

До невідомих Т-подібної СЗ (рис. 1) належать індуктивності статора ( $L_1$ ), ротора ( $L_2$ ) і контуру намагнічування ( $L_\mu$ ), активний опір ротора ( $R'_2$ ), струм кола ротора ( $I_{2ak}$ ,  $I_{2bk}$  – косинусні і синусні складові). Струм  $I_\mu$  у контурі намагнічування можна виразити через складові струмів статора і ротора:  $I_{\mu ak} = I_{1ak} - I_{2ak}$ ,  $I_{\mu bk} = I_{1bk} - I_{2bk}$ , де  $I_{1ak}$  і  $I_{1bk}$ ,  $I_{2ak}$  і  $I_{2bk}$  – відповідно косинусні і синусні складові струмів статора і ротора. У разі застосування іншої СЗ з більшою кількістю контурів і елементів, а, відповідно, і більшою кількістю невідомих, рівняння складових миттєвої потужності можна розділити на канонічні і

неканонічні складові. Таким чином, застосування методів ідентифікації ЕМП АЕП на основі балансу миттєвої потужності дозволяє отримати кількість рівнянь, що є навіть більшою за кількість невідомих параметрів (табл. 1), а це, у свою чергу, дає можливість виконати розрахунок ЕМП АЕП за допомогою чисельних методів розв'язку систем нелінійних рівнянь.

Таблиця 1 – Залежність кількості рівнянь канонічних і неканонічних складових від числа гармонік

Число гармонійних складових струму і напруги	Кількість рівнянь за складовими		Кількість невідомих параметрів		Загальна кількість рівнянь
	канонічних	неканонічних	зі складовими струмів		
2	5	4	4	8	9
3	7	8	4	10	15
4	9	12	4	12	21
К	2k+1	4(k-1)	4	4+2k	6k

Проведений у роботі аналіз чисельних методів дозволив сформулювати рекомендації щодо їх застосування при ідентифікації ЕМП АЕП за наявності/відсутності початкових наближень та обмежень.

У результаті аналітичних досліджень сформована гіпотеза роботи, яка полягає у модифікації методу ідентифікації ЕМП АЕП на основі рівнянь балансу миттєвої потужності, які доповнені нелінійними залежностями активного опору і індуктивності ротора від струму, що дозволяє врахувати варіацію ЕМП у пускових режимах під впливом ефекту витіснення струму.

У **третьому розділі** представлено математичний апарат формування ідентифікаційних рівнянь балансу складових миттєвих потужностей на основі рядів Фур'є у сукупності з обмеженням вихідних сигналів струму та напруги із застосуванням принципу осьової симетрії. Показано, що отримані за допомогою операцій типу «зсув» та «оберт» полігармонічні сигнали, які володіють осьовою симетрією другого роду або третього роду зі зсувом по осі абсцис, мають необхідний гармонійний склад для розрахункової процедури ідентифікації ЕМП АЕП у перехідних режимах. Це дозволяє отримати чотири варіанти формування псевдогармонічних сигналів, що характеризуються певними властивостями.

Функцію полігармонічного сигналу  $f'(t)_{[0,T']}$  для періоду повторюваності  $T'$  можна представити у вигляді:

$$f'(t)_{[0,T']} = f(t)_{[0,T'/2]} + f'(t)_{[T'/2,T']}, \quad (5)$$

де  $f(t)_{[0,T'/2]}$  – функція потрібного сигналу, задана на першому напівперіоді;  $f'(t)_{[T'/2,T']}$  – функція, отримана шляхом зсуву або повороту потрібного сигналу і представлена на другому напівперіоді.

Перший випадок відповідає зсуву потрібного сигналу вправо на величину, рівну напівперіоду. Це найпростіший випадок, коли сигнал на кожному періоді має такий самий вигляд, як і на першому напівперіоді, який вибирається в якості

періоду полігармонічного сигналу. Якщо в якості потрібного сигналу вибирається синусоїдальний, то його можна представити у вигляді:

$$f(t)_{[0, T'/2]} = U_m \sin(\Omega t), \quad (6)$$

де  $U_m$  – амплітуда зміни синусоїдального сигналу.

Тоді для отримання полігармонічного сигналу на першому напівперіоді розглядається ділянка сигналу з періодом  $T'$ .

Другий випадок отримання полігармонічного сигналу відповідає такому виконанню дій, коли шуканий сигнал, заданий на ділянці  $T'/2$ , симетрично відображають відносно осі ординат. При цьому повний період полігармонічного сигналу становить  $T'$ .

Це найпростіші способи отримання полігармонічних сигналів, що характеризуються осьовою симетрією першого роду, але вони мають істотний недолік – наявність постійної складової. Тому в роботі запропонованого для ідентифікації ЕМП АЕП формувати тестові полігармонічні сигнали, що мають осьові симетрії другого роду або третього роду зі зсувом по осі абсцис  $i$ , відповідно, не містять постійної складової.

Запропонований спосіб формування полігармонічних сигналів, що володіють однією або декількома видами симетрій, дозволяє проводити ідентифікацію ЕМП АЕП методами на основі балансу миттєвих потужностей з джерелами синусоїдальної напруги живлення. Тобто технічна реалізація запропонованого способу може виконуватися без застосування джерел живлення полігармонічної напруги, таких як перетворювачі частоти або тиристорні регулятори напруги.

Встановлено, що одночасне врахування нелінійності в активному опорі і індуктивності ротора АД є доцільним при розгляді пускового режиму роботи АЕП, так як в цьому режимі схильні до значної зміни обидва даних параметра. А, згідно з результатами ідентифікації ЕМП АЕП, з урахуванням залежностей виду (2) з живленням від джерела синусоїдальної напруги це дозволяє визначати активний та індуктивний опір ротора з урахуванням ефекту витіснення струму, а також коефіцієнт, що враховує витіснення струму.

**У четвертому розділі** представлені теоретичні дослідження за запропонованим методом ідентифікації ЕМП АЕП для першої, третьої та п'ятої гармонік напруги і струму статора при використанні в якості джерела живлення накопичувачів енергії (конденсаторної батареї КБ і двигуна постійного струму ДПС) для чотирьох рівнів початкової напруги живлення – 220 В, 180 В, 120 В і 40 В. Згідно з отриманими результатами ідентифікації ЕМП АЕП при зниженні напруги живлення, відповідно, і вплив ефекту витіснення струму на активний і індуктивний опір ротора зменшується. Це призводить до того, що і нелінійні зміни активного та індуктивного опорів ротора проявляються меншою мірою, і, як наслідок, падіння рівня вищих гармонік у сигналі струму, що безпосередньо впливає на результат ідентифікації ЕМП АЕП у вигляді зростання похибок при розв'язку системи ідентифікаційних рівнянь. У результаті розроблено алгоритм роботи системи ідентифікації ЕМП АЕП з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі в пускових режимах (рис. 2).

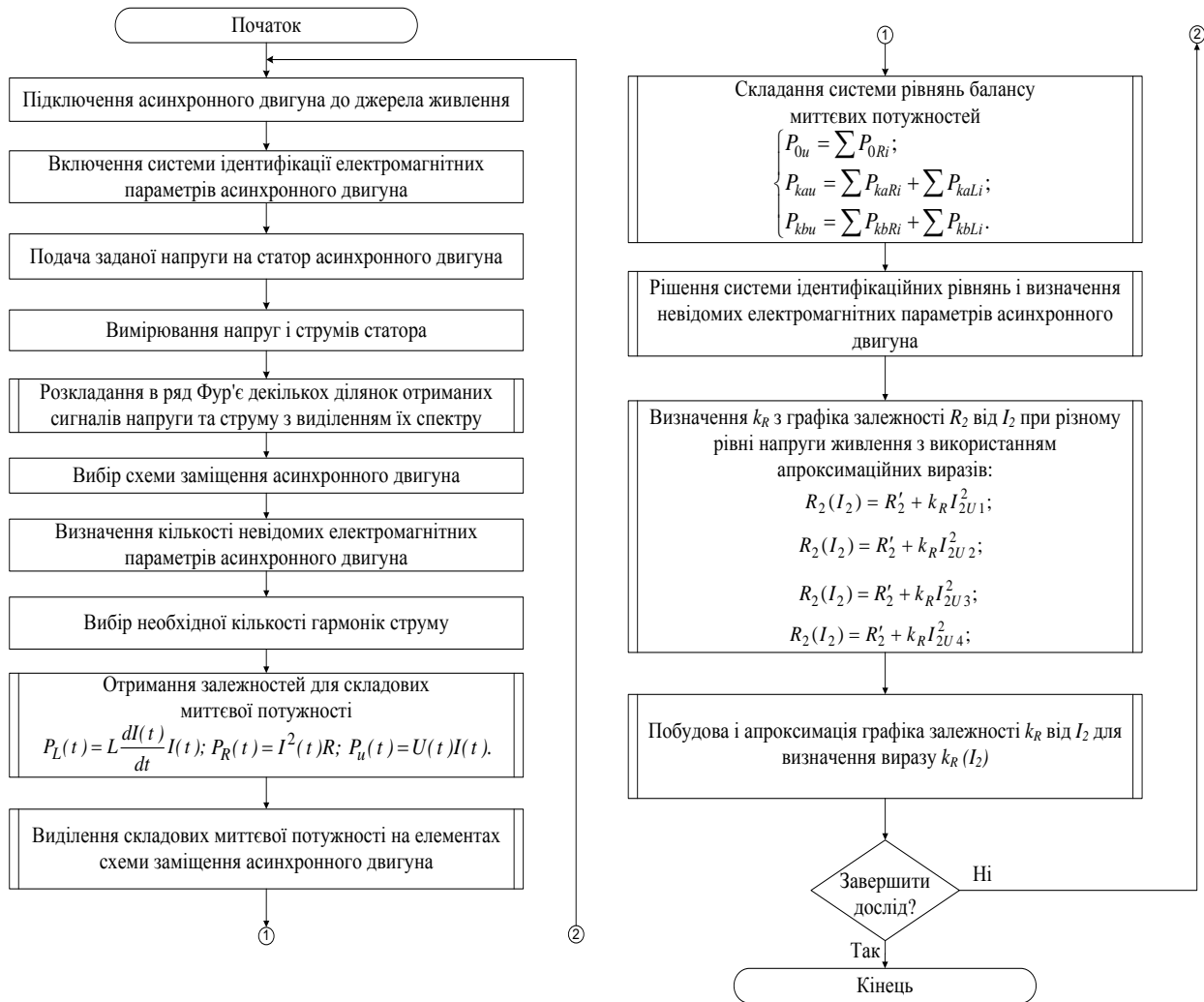


Рисунок 2 – Алгоритм роботи системи ідентифікації ЕМП АЕП

Також представлені схемо-технічні рішення електротехнічного комплексу для ідентифікації ЕМП АЕП (рис. 3), що реалізує розроблений метод. Запропоновано для формування необхідного тестового сигналу струму, що подається на статор АД, еквівалентного за значенням пусковому струму, використовувати у якості джерела живлення накопичувачів енергії двох типів – конденсаторних батарей (КБ) та електромеханічних перетворювачів. Експериментальні дослідження на розробленому лабораторному вимірювально-діагностичному стенді показали, що застосування накопичувачів енергії дозволяє штучно формувати режими роботи АЕП, параметри якого підлягають ідентифікації, максимально наближені до пускових. Так, використовуючи перший (рис. 3, а) або другий (рис. 3, б) типи накопичувачів, можна отримати перехідні процеси у вигляді згасаючих сигналів струму і напруги необхідного рівня та гармонійного складу для ідентифікації ЕМП АЕП з урахуванням ефекту витіснення струму.

Встановлено, що застосування другого типу накопичувача – електромеханічного перетворювача, наприклад, ДПС з незалежним збудженням – є більш прийнятним, так як живлення АД здійснюється за допомогою затухаючого сигналу напруги, що знижує ризик перегріву обмоток ротора і пошкодження ізоляції. Застосування КБ також можливе, але пов'язано з певними труднощами.

Так, енергія, що запасена в КБ, повинна забезпечувати відповідний рівень номінальної напруги живлення АД, а в разі дослідження двигунів великої потужності вартість таких КБ та їх габаритні розміри будуть значні.

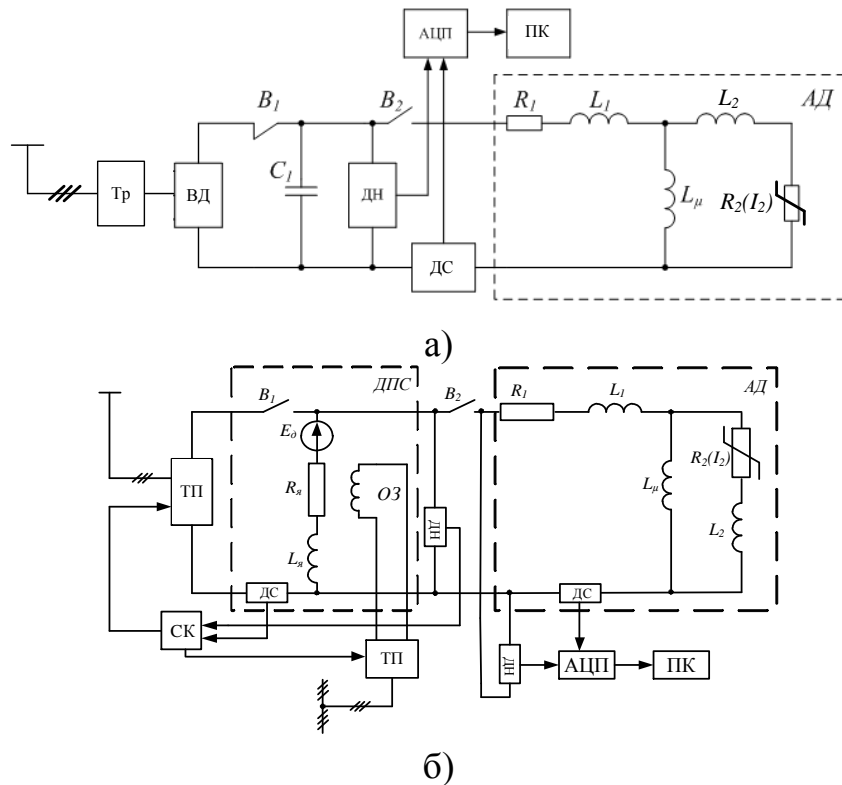


Рисунок 3 – Схеми електротехнічного комплексу для визначення ЕМП АД

На рис. 3 прийняті наступні позначення: АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПК – персональний комп'ютер; ДН – датчик напруги; ДС – датчик струму;  $B_1$ ,  $B_2$  – перемикачі; ОЗ – обмотка збудження; СК – система керування ТП.

Також для аналізу впливу зміни ЕМП АЕП на його характеристики і на налаштування системи керування розроблена математична модель АЕП з АД з двоклітковим ротором, структурна схема якої представлена на рис. 4.

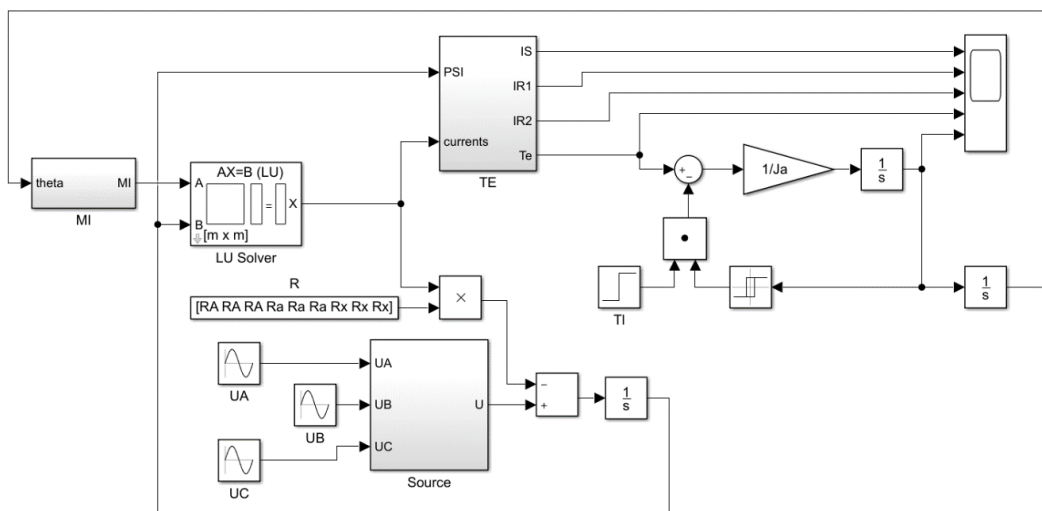


Рисунок 4 – Структурна схема математичної моделі двокліткового АД в MATLAB

Представлена модель (рис. 4) включає в себе наступні основні елементи: підсистема Source обчислює вектор-стовпець напруг живлення; підсистема MI призначена для обчислення матриці взаємних індуктивностей; блок LU Solver призначений для вирішення матричного рівняння і обчислення поточного значення струмів в окремих обмотках АД; блок TE обчислює обертаючий момент двокліткового АД. Результати математичного моделювання процесів запуску двокліткового АД типу 4A112M2 УЗ і подальшого накиду навантаження наведені на рис. 5.

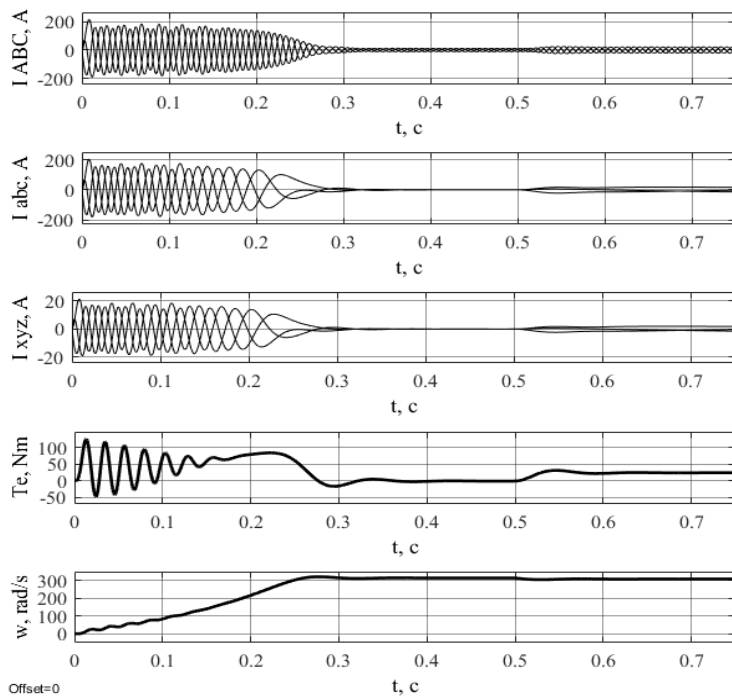
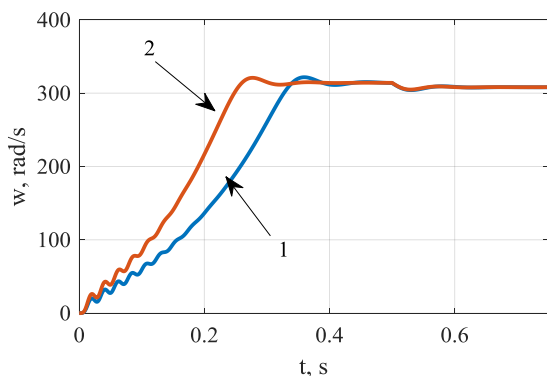


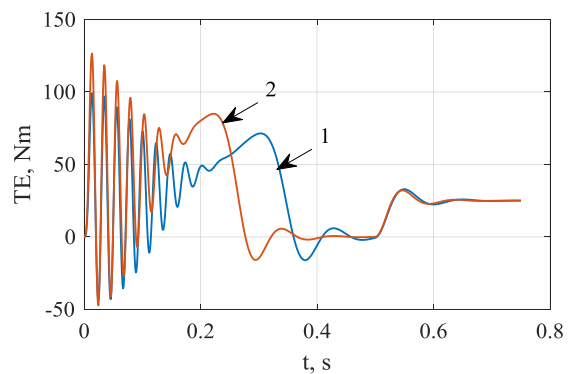
Рисунок 5 – Діаграми сигналів двокліткового АД при пуску і накиді навантаження

параметрів в межах  $\pm 10\%$  від розрахункового значення. Встановлено, що найбільша параметрична чутливість результатів розрахунків викликана саме відхиленнями індуктивного опору розсіювання роторних обмоток. Виконані дослідження підтвердили також надзвичайно малу залежність результатів обчислень при зміні методів інтегрування, що свідчить про алгоритмічну стійкість розробленої математичної моделі двокліткового АД.

Для перевірки адекватності та відповідності числових результатів моделювання був виконаний порівняльний аналіз пускових процесів двокліткового АД і АД стандартної конструкції з ідентичними електромагнітними і механічними параметрами моделі (рис. 6).



кутова швидкість



електромагнітний момент

Рисунок 6 – Порівняльні діаграми сигналів пуску АД з двоклітковим ротором (2) і стандартного АД (1)

Як показує порівняльний аналіз отриманих результатів, для АД з двоклітковим ротором тривалість запуску становить 0,25 с. Для АД стандартної конструкції час пуску склав 0,4 с, тобто час запуску зменшився на 37,5 %. Цей результат пояснюється збільшенням середньої величини пускового моменту (рис. 6, б), що збігається з теоретичними уявленнями про роботу АД з двоклітковим ротором.

У п'ятому розділі для перевірки адекватності запропонованого методу ідентифікації ЕМП АЕП проведено експериментальні дослідження на розробленому вимірювально-діагностичному стенді, що реалізований за схемою рис. 3, б. Тестові сигнали струму та напруги до та після фільтрації, яка необхідна для підвищення точності ідентифікації, для визначення ЕМП АЕП з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі в пускових режимах наведені на рис. 7.

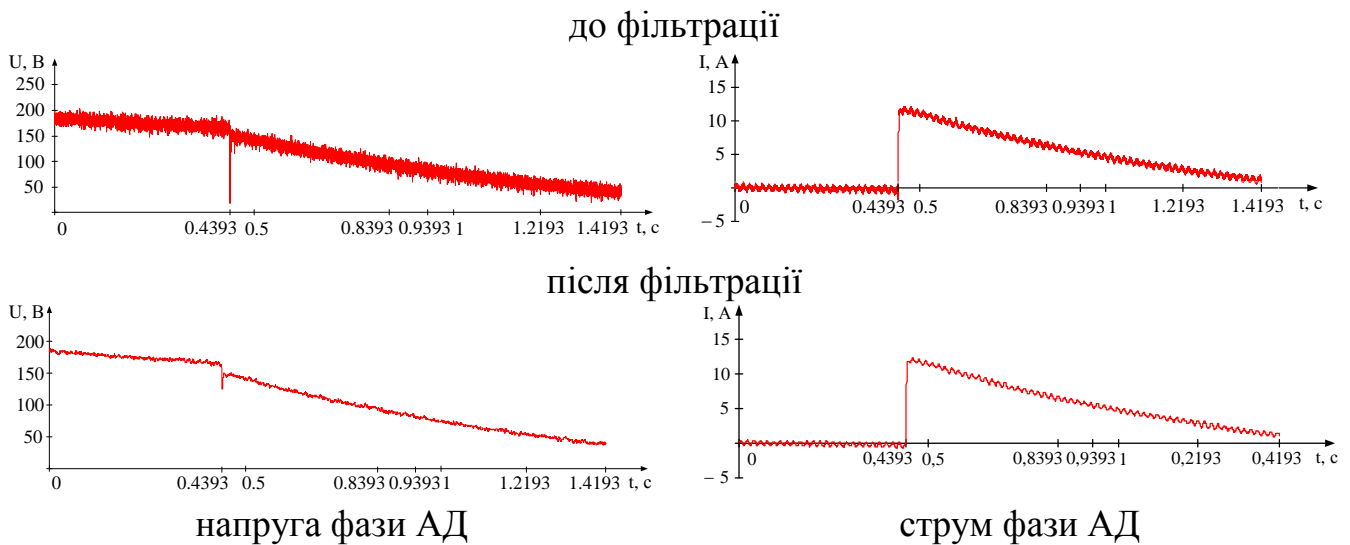


Рисунок 7 – Тестові сигнали струму та напруги для ідентифікації ЕМП АД

Ідентифікація ЕМП АЕП проводилась для п'яти часових ділянок тривалістю 0,01 с кожна, а необхідний гармонійний склад сигналів струму і напруги забезпечувався шляхом запропонованих у роботі принципів осьової симетрії та способів формування нового періоду повторення. Зокрема, застосовувалась осьова симетрії третього роду зі зсувом при розгляді першої, третьої та п'ятої гармонік. Результати ідентифікації ЕМП АЕП представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати ідентифікації ЕМП АД із залежністю опору  $R_2$  від квадрата струму  $I_2$

Ідентифіковані параметри СЗ					
$t, c$	0,4393– 0,4493	0,4493– 0,4593	0,8393– 0,8493	0,9393– 0,9493	1,2193– 1,2293
$L_\mu, Гн$	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052
$L_1, Гн$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	$5,154 \cdot 10^{-3}$	$5,154 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,429 \cdot 10^{-3}$
$L'_2, Гн$	$5,43 \cdot 10^{-3}$	$5,321 \cdot 10^{-4}$	$5,321 \cdot 10^{-3}$	$5,267 \cdot 10^{-3}$	$5,321 \cdot 10^{-3}$
$R_2(I_2), Ом$	2,94	3,4	1,85	1,65	1,315
$R'_2, Ом$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$k_R, 1/A^2$	0,0178	0,0172	0,0174	0,0169	0,0171



Згідно з отриманими результатами ідентифікації ЕМП АЕП, на п'яти ділянках сигналів напруги та струму, значення  $R_2$  відповідають вихідним, а коефіцієнт витіснення струму  $k$  має величину у межах від 0,0169 до 0,0178.

Виконано техніко-економічне обґрунтування використання методу ідентифікації ЕМП АЕП з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі, що досягається за рахунок менших витрат на придбання матеріалів, обладнання та комплектуючих випробувального стенду, а також за рахунок зменшення кількості персоналу згідно запропонованої автоматизації розрахункової частини процедури ідентифікації. Окрім того, запропонована система випробувального комплексу для дослідження АД з урахуванням витіснення струму в роторі має значну перевагу за собівартістю з аналогом виготовленого на підприємстві при збереженні високої точності ідентифікації ЕМП АЕП за нетривалої за часом процедури випробування.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі отриманих теоретичних результатів та їх систематизації розв'язано актуальне наукове завдання підвищення точності визначення параметрів АЕП з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі з використанням методики формування тестових полігармонічних сигналів струмів і напруг із заданим гармонійним складом, а також при використанні в якості джерела живлення накопичувача енергії, що дозволяє отримати необхідний пусковий струм без ризику перегріву обмоток ротора і пошкодження ізоляції.

Результати досліджень, проведених за темою дисертаційної роботи, дозволяють сформулювати такі висновки.

1. На основі результатів аналізу класифіковані на окремі групи методи визначення електромагнітних параметрів асинхронних двигунів за особливостями їх застосування, перевагами і недоліками. Сформульовані вимоги до порядку дій при ідентифікації ЕМП АЕП в пусковому режимі.

2. Доведено на основі розрахунків, що похибки ідентифікації ЕМП, в залежності від обраної методики розрахунку для АД різної потужності та конструктивного виконання, досягають до 80,68 %. Встановлено, що зменшення похибок ідентифікації ЕМП АЕП в пусковому режимі досягається шляхом врахування ефекту витіснення струму в роторі.

3. Проведена апроксимація відомих з літературних джерел графіків зміни активного та індуктивного опорів ротора під впливом ефекту витіснення струму і отримані аналітичні залежності активного опору та індуктивності ротора від струму ротора і статора, що дозволяє уточнити рівняння балансу миттєвих потужностей та підвищити точність ідентифікації ЕМП.

4. Представлено математичний апарат формування з початкових неперіодичних сигналів на довільному періоді необхідних полігармонічних сигналів струму і напруги із застосуванням різних типів осьової симетрії та зменшення періоду початкового сигналу на відповідні кути урізання, що дозволяє отримати необхідну кількість та заданий гармонічний склад цих сигналів для отримання нового періоду повторення з метою застосування аналітичних процедур ідентифікації ЕМП АЕП з використанням рядів Фур'є.

5. При проведенні експериментальних досліджень і верифікації розроблених методів ідентифікації ЕМП АЕП в якості джерел живлення запропоновано використовувати накопичувачі енергії, що дозволяє отримати тестові сигнали струму та напруги наближені до значень у пускових режимах та при загальмованому роторі.

6. Розроблено структуру електротехнічного комплексу зі схемними рішеннями щодо його комплектації для реалізації розробленого методу ідентифікації ЕМП АЕП на підставі рівнянь балансу миттєвої потужності з урахуванням впливу ефекту витіснення струму в роторі, які містять конденсаторні або електромеханічні накопичувачі енергії та дозволяють штучно формувати режими роботи АЕП, параметри якого підлягають ідентифікації, максимально наближені до пускових.

7. Шляхом експериментальних досліджень підтверджено адекватність запропонованого модифікованого методу ідентифікації ЕМП АЕП на підставі рівнянь балансу миттєвої потужності з урахуванням впливу ефекту витіснення струму в роторі за отриманими в роботі аналітичними залежностями активного опору та індуктивності ротора – відносна похибка не перевищує 3 %.

8. Техніко-економічний порівняльний аналіз підтвердив доцільність реалізації електротехнічних комплексів з ідентифікації ЕМП АЕП за запропонованим модифікованим методом та відповідною технічною реалізацією. Встановлено, що у порівнянні з існуючими промисловими зразками, вартість реалізації вимірювально-діагностичного комплексу за запропонованих схемних рішеннях на 26 % менша для стендів по випробуванню АД до 100 кВт і на 48 % для стендів для АД понад 100 кВт.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### ***Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:***

*Статті у закордонних виданнях, занесених до міжнародних наукометричних баз даних*

1. Zagirnyak M., Rodkin D., Romashykhin Iu., Chenchevoi V., Rudenko M. Identification of nonlinearities of induction motor equivalent circuits with the use of the energy method. Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 17th International Conference. Sandomierz, Poland, 2016. P. 1–4. (*Scopus*)

*Статті у журналах України, занесених до міжнародних наукометричних баз даних*

2. Rudenko M., Romashykhin Iu., Kuznetsov V. The possibilities of the energy method for identifying the parameters of induction motor. Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). Kremenchuk, Ukraine, 2017. P. 128–131. (*Scopus*)

3. Руденко Н. А., Ромашихин Ю. В. Баланс мощностей в задачах идентификации параметров двухклеточных асинхронных двигателей. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, Україна. 2014. № 3 (27). С. 45–52. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, Directory of Research Journals Indexing, Scientific Indexing Services*)

4. Руденко Н. А., Ромашихин Ю. В., Родькин Д. И. Классификация методов оценивания параметров асинхронных двигателей. *Електромеханічні і*

*енергозберігаючі системи*. Кременчук, Україна. 2015. № 4 (32). С. 25–32. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, InfoBase Index, Directory of Research Journals Indexing, Universal Impact Factor, Research Bible, Scientific Indexing Services*)

5. Руденко Н. А., Родькин Д. И., Ромашихин Ю. В. Оценка нелинейных параметров асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, Україна. 2016. № 4 (36). С. 54–65. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, InfoBase Index, Google Scholar, Directory of Research Journals Indexing, Universal Impact Factor, Research Bible, Scientific Indexing Services*)

6. Руденко Н. А., Родькин Д. И., Ромашихин Ю. В. Идентификация нелинейных параметров ротора схемы замещения асинхронного двигателя с использованием накопителей энергии. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук, Україна. 2017. № 1 (37). С. 21–27. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, CiteFactor, Polish Scholarly Bibliography, InfoBase Index, Google Scholar, Directory of Research Journals Indexing, Universal Impact Factor, Research Bible, Scientific Indexing Services*)

#### *Статті у провідних фахових виданнях України*

7. Руденко М. А., Зачепа Ю. В. Идентификация нелинейных параметров асинхронного двигателя в пусковом режиме с живлением от электромеханического накопителя энергии. *Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика*. 2019. № 16 (1341). С. 55–59. – ISSN 2079-8024.

8. Ромашихин Ю. В., Мосюндз Д. А., Руденко Н. А., Родькин Д. И. Эффективность численных методов решения систем нелинейных уравнений баланса составляющих мгновенной мощности. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. № 2 (18). С. 27–34.

9. Ромашихин Ю. В., Руденко Н. А., Мошковский В. Ю. Псевдополигармонические сигналы мощности для задач идентификации электромагнитных параметров электрических машин. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. № 4 (20). С. 103–107.

10. Руденко Н. А., Ромашихин Ю. В., Мошковский В. Ю. Особенности получения псевдополигармонических составляющих напряжения и тока синусоидальной формы. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. № 4 (20). С. 122–126.

#### *Статті у журналах України*

11. Ромашихин Ю. В., Руденко Н. А. К определению псевдополигармонических сигналов в задачах гармонического анализа. *Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах*. 2013. № 1 (1). С. 34–50. URL: <http://eetecs.kdu.edu.ua>.

#### ***Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:***

12. Rudenko M., Romashykhin Iu. Pseudopolyharmonic signals in the tasks of parameters identification of induction motors. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*: збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук, 09–11 квітня 2013 р.). Кременчук: КрНУ, 2013. С. 134–135.

13. Rudenko M. Principle of symmetry in the tasks of harmonic analysis on arbitrary interval. XV International PhD Workshop OWD 2013. Conference Archives PTETIS. 2013. Vol. 33. P. 183–187.

14. Rudenko M., Romashykhin Iu. The possibilities of energy method application for identification of the electromagnetic parameters of double squirrel cage rotor induction motors. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*: збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук, 10–11 квітня 2014 р.). Кременчук: КрНУ, 2014. С. 130–131.

15. Руденко Н. А., Ромашихин Ю. В. Целесообразность учета эффекта вытеснения тока в роторе при определении параметров асинхронных двигателей. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*: збірник наукових праць XIV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук, 14–15 квітня 2016 р.). Кременчук: КрНУ, 2016. С. 120–121.

16. Rudenko M., Romashykhin Iu. Identification of nonlinear rotor's resistance of induction motor in the starting operation modes. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*: збірник наукових праць XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук, 11–12 квітня 2017 р.). Кременчук: КрНУ, 2017. С. 176–178.

17. Rudenko M., Romashykhin Iu., Budiak D. Parameters identification of induction motors in the starting modes of operation on the basis of energy method. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*: збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (Кременчук, 12–13 квітня 2018 р.). Кременчук: КрНУ, 2018. С. 101–102.

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

18. Руденко М. А., Родькін Д. Й., Ромашихін Ю. В., Авраменко Д. С. Спосіб ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів в пускових режимах роботи: пат. 119742 Україна: G01R 27/08. заявл. 21.03.17; опубл. 10.10.17, Бюл. № 19.

## АНОТАЦІЯ

**Руденко М. А.** Визначення параметрів електропривода з асинхронним двигуном і врахуванням ефекту витіснення струму. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи» (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, Кременчук, 2021.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.01 Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

В дисертації розв'язано актуальне наукове завдання з ідентифікації

електромагнітних параметрів асинхронних двигунів з урахуванням ефекту витіснення струму для налаштування систем керування електроприводами.

Унаслідок різних причин асинхронні двигуни виходять з ладу й надходять у ремонт, де після проведення відповідних робіт проходять післяремонтні випробування, а вже після, як правило, повертаються в той же технологічний цикл. Однак параметри, і зокрема, електромагнітні параметри таких асинхронних двигунів здебільшого відрізняються від початкових, встановлених заводом-виробником. Недостовірна інформація про фактичні параметри асинхронних двигунів призводить до невірної налаштування систем керування електроприводами та пристроїв захисту, а, відповідно, знижує енергоефективність їх роботи та може привести до повторного виходу з ладу. На сьогодні всі регламентовані методи та методики післяремонтних випробувань дозволяють з достатньою точністю ідентифікувати параметри асинхронних двигунів для усталених режимів, що характеризується незмінністю електромагнітних параметрів двигунів у процесі роботи. Однак ця умова не враховує ряд особливостей при роботі асинхронних двигунів у перехідних режимах, зокрема, нелінійних характеристик зміни опорів ротора у пускових режимах.

Проаналізовано процес витіснення струму в роторі загальнопромислових асинхронних двигунів і пов'язане з цим явищем збільшення опору ротора. В результаті чого отримані поліноміальні вирази для нелінійних параметрів роторного контуру Т-подібної схеми заміщення, а саме активного опору та індуктивності шляхом апроксимації графіків їх зміни при пуску двигуна.

Розроблено математичний апарат для одержання різних типів та видів полігармонічних сигналів із застосуванням зменшення періоду початкового сигналу на відповідні кути урізання та принципу осьової симетрії, що дозволяє отримати необхідний гармонічний склад для формування нелінійних ідентифікаційних рівнянь балансу миттєвих потужностей з використанням енергетичного методу.

Доведена можливість і доцільність застосування накопичувачів енергії у вимірювально-діагностичних комплексах для післяремонтних випробувань асинхронних двигунів, що дозволяють отримати необхідні тестові сигнали струмів та напруг, що за значеннями є наближеними до пускових, навіть при загальмованому роторі та без ризику пробою ізоляції чи її руйнації та перегріву. Це дозволяє провести ідентифікацію ЕМП АД з використанням енергетичного методу в умовах, близьких до пуску двигуна, за яких ефект витіснення струму має найбільший вплив на зміну ЕМП ротора двигуна.

Експериментально підтверджено, що на підставі отриманих поліноміальних залежностей активного опору та індуктивності ротора і за умови відпрацювання розробленого алгоритму роботи системи ідентифікації ЕМП АД можливо підвищити точність їх визначення при проведенні післяремонтних випробувань.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, ефект витіснення струму в роторі, енергетичний метод, ідентифікація електромагнітних параметрів, полігармонічні сигнали, миттєва потужність, накопичувачі енергії, баланс миттєвих потужностей, асинхронний електропривод.

**ABSTRACT**

**Rudenko M.** Determining the parameters of electric drive with induction motor and taking into account the effect of current displacement. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Cand. Sc. for the specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems (141 – Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kremenchuk, 2021.

The dissertation will be defended at a meeting of the specialized scientific council D 45.052.01 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University.

The dissertation is solved to date the actual scientific task of improving the accuracy of identification of electromagnetic parameters of induction motors in starting modes.

The process of current displacement in the rotor of common induction motors is analyzed and the related with it phenomenon of increase of rotor resistance. As a result, polynomial expressions are obtained for the nonlinear parameters of the rotor circuit of a T-shaped equivalent circuit, namely active resistance and inductance, by approximating the graphs of their change when motor is starting.

A mathematical apparatus for obtaining different types and kinds of pseudopolyharmonic signals has been developed with the use of reducing the initial signal period by the corresponding cutoff angles and the principle of axial symmetry, which allows to obtain the necessary harmonic composition for the formation of nonlinear identification equations of the instantaneous power balance using the energy method.

Possibility and expediency of using energy storage devices in measuring and diagnostic complexes for post-repair tests of induction motors, which allow to obtain the necessary test signals of currents and voltages, which are close to the starting ones, even with a braked rotor and without the risk of isolation breakdown or its destruction and overheating is proved. This allows identify EMP of IM using the energy method in conditions close to the start of motor, in which the effect of displacement current has a greatest effect on the change of EMP of motor's rotor.

It is experimentally confirmed that based on the obtained polynomial dependences of active resistance and rotor inductance, and provided working out of the developed algorithm of operation of the identification system of EMP of IM, it is possible to improve accuracy of their determination during post-repair tests.

**Keywords:** induction motor, the effect of current displacement in the rotor, the energy method, identification of electromagnetic parameters, pseudopolyharmonic signals, instantaneous power, energy storage, instantaneous power balance, induction electric drive.

Руденко Микита Андрійович

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З АСИНХРОННИМ  
ДВИГУНОМ І ВРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ ВИТІСНЕННЯ СТРУМУ**

(Автореферат)

Підписано до друку 23.03.2021. Формат 30x42/4.

Папір Polspeed. Друк цифровий. Ум. друк. арк. 0,9.

Обліково-видавн. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Замовлення № 20391.

Редакційно-видавничий відділ  
Кременчуцького національного університету  
імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600